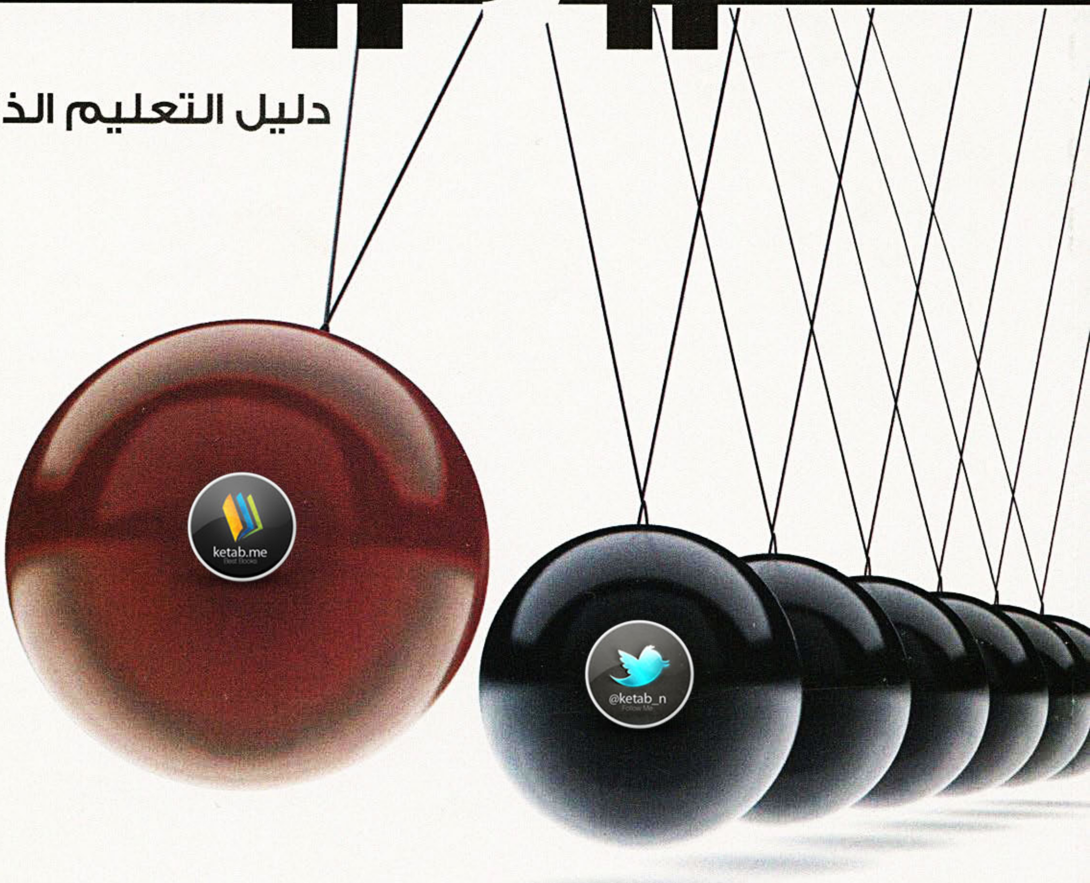
كشف أسرار الفيزياء

دليل التعليم الذاتي



ستان جيبلسكو

- الكثير من الأمثلة التوضيحية التي تربط الفيزياء بالعالم الحقيقي
- يغطي جميع المفاهيم الأساسية في الفيزياء التقليدية
- مناقشة واضحة لأساسيات نظرية النسبية
- يتضمن أرضية أساسية للرياضيات الفيزيائية

ketab.me
Best Books

١٤٩٥٧٨

كشف أسرار
الفيزياء
physics

دليل التعليم الذاتي

الناشرين

الإمارات العربية المتحدة - أبو ظبي - هاتف 6314485 2 971 + - فاكس 6314462 2 971+
ص.ب 2380 - الموقع على شبكة الإنترنت: http://www.kalima.ae

لبنان - بيروت - هاتف 786233 - 785108 - 785107 1 961+ - فاكس: 786230 1 961+
ص.ب 5574-13 - الموقع على شبكة الإنترنت: http://www.asp.com.lb

الدار العربية للعلوم ناشرون ش.م.ل
Arab Scientific Publishers, Inc. SAL

الطبعة الأولى 1430هـ - 2009م
ردمك 978-9953-87-026-7

جميع الحقوق العربية محفوظة

الدار العربية للعلوم ناشرون ش.م.ل عين التينة، شارع المفتي توفيق خالد، بناية الريم،
هاتف: 786233 - 785108 - 785107 (1-961+) - ص.ب: 5574-13 شوران - بيروت 2050-1102 - لبنان
فاكس: 786230 (1-961+) - البريد الإلكتروني: asp@asp.com.lb - الموقع على شبكة الإنترنت: http://www.asp.com.lb

يتضمن هذا الكتاب ترجمة الأصل الإنكليزي PHYSICS
حقوق الترجمة العربية مرخّص بها قانونيًا من الناشر McGraw-Hill/Osborne
بمقتضى الاتفاق الخطي الموقّع بينه وبين الدار العربية للعلوم ناشرون، ش.م.ل.

Copyright © 2002 by The McGraw-Hill Companies, Inc.
Arabic Copyright © 2006 by Arab Scientific Publishers, Inc. S.A.L

إن هيئة أبو ظبي للثقافة والتراث "كلمة" والدار العربية للعلوم غير مسؤولين عن آراء المؤلف وأفكاره، وتعبّر الآراء الواردة في هذا الكتاب عن آراء المؤلف، ولا تعبّر بالضرورة عن آراء الهيئة.

يمنع نسخ أو استعمال أي جزء من هذا الكتاب بأي وسيلة تصويرية أو الكترونية أو ميكانيكية بما فيه التسجيل الفوتوغرافي والتسجيل على أشرطة أو أقراص مقروءة أو أي وسيلة نشر أخرى بما فيها حفظ المعلومات، واسترجاعها من دون إذن خطي من الناشر

كشف أسرار
الفيزياء
physics

دليل التعليم الذاتي

تأليف

ستان جيبلسكو

ترجمة

م. بسام صقر العقباني

مراجعة وتحرير

مركز التعريب والبرمجة

كلمة
KALIMA

الدار العربية للعلوم ناشرون ش.م.ل
Arab Scientific Publishers, Inc. SAL

المحتويـــات

الباب صفر
مراجعة للرياضيات

الباب الأول

الفيزياء التقليدية

الباب الثاني

الكهرباء، والمغنطيسية، والإلكترونات

الباب الثالث

الأمواج، والجُسيْمات، والفضاء، والزمن

المقدمة

يتوجه هذا الكتاب للقراء الذين يرغبون بتعلم الفيزياء الأساسية دون الانخراط في دورة دراسية رسمية. يمكن أن يخدم هذا الكتاب أيضاً كمتمم للصفوف التعليمية، والدروس الخاصة، أو في بيئة التعليم المنــزلي. نقترح عليك أن تبدأ بالكتاب من البداية وأن تنجزه كاملاً مع إمكانية استثناء الباب صفر.

يمكنك تجاوز الباب صفر إذا كنت واثقاً من قدرتك في الرياضيات. ولكن قدّم على أي حال اختبار الــباب صــفر، لتــرى إذا كُــنت جاهزاً فعلياً للانتقال إلى الباب الأول. إذا كان 90 بالمائة من أجوبتك صــحيحاً، ستكون عندها جاهزاً. إذا حصلت على 75 إلى 90 بالمائة من الأجوبة صحيحة، عُدْ عندها إلى الــباب الأول وقدِّم الامتحانات الموجزة في نهاية كل فصل. إذا حصلت على أقل من ثلاثة أرباع الأجوبة صــحيحة في الامتحانات الموجزة والاختبار الموجود في نهاية الباب، فما عليك إلا أن تدرس الباب صفر. سيكون ذلك تدريباً لك وسيقدم لك المهارات الضرورية وسيجعل باقي الكتاب سهلاً.

يجــب أن تمــتلك بعض المهارات الرياضية لتعلم الفيزياء؛ فالرياضيات هي لغة الفيزياء. وإذا قلنا غير ذلك فنحن نغشك. لا تتخوف من ذلك فمستوى الرياضيات في هذا الكتاب لا يتجاوز مستوى الصفوف الثانوية.

يحــتوي هذا الكتاب على الكثير من الامتحانات الموجزة العملية، والاختبارات، وأسئلة الامتحانات. هذه الأسئلة متعددة الخيارات وهي مشابهة لأسئلة الاختبارات القياسية. يوجد امتحان موجز قصير في نهاية كــل فــصل. الامتحانات الموجزة "مفتوحة". ربما تعود (ويجب أن تعود) إلى نص الفصل عن تقديم هذه الامــتحانات. عــندما تظن أنك جاهز، قدِّم الامتحان الموجز، اكتب أجوبتك وأعطِ لائحة الأجوبة إلى صــديق، دع صديقك يعطيك النتيجة، ولكن لا تدعه يعطيك الأجوبة الخاطئة. الأجوبة مسرودة في نهاية الكتاب. ابقَ ملازماً للفصل حتى تحصل على معظم الأجوبة الصحيحة.

جرى تقسيم هذا الكتاب إلى ثلاثة أبواب رئيسية بعد الباب صفر. يوجد اختبار متعدد الخيارات بعد نهايــة كــل باب. قدم هذه الاختبارات عند إنهائك للأبواب الموافقة وبعد تقديم جميع الامتحانات الموجزة الخاصــة بالفــصول. اختبارات الأبواب "مغلقة". لا تعد إلى النص عند تقديم اختبارات الأبواب. الأسئلة ليــست بدرجة صعوبة أسئلة الامتحانات الموجزة، ولا تتطلب منك تذكر القضايا البسيطة. النتيجة المقنعة هي أن تكون ثلاثة أرباع الأجوبة صحيحة. مرة أخرى إن الأجوبة في نهاية الكتاب.

يوجد امتحان نهائي في نهاية هذه الدورة الدراسية. الأسئلة عملية، وتحتوي على رياضيات بشكل أقل مــن أســئلة الامتحانات الموجزة. يحتوي الامتحان النهائي على أسئلة مستخلصة من الباب الأول والثاني والــثالث. قدِّم هذا الامتحان عندما تنتهي من جميع الأبواب، وبعد تقديم جميع اختبارات الأبواب، وجميع امتحانات الفصول الموجزة. تكون النتيجة مقنعة إذا كان 75 بالمائة من الأجوبة صحيحاً.

ليكن لديك صديق يخبرك بنتيجة اختبارات الأبواب، وبنتيجة الامتحان النهائي، وبنتيجة الامتحانات الموجـــزة أيضاً دون أن يخبرك بالأسئلة التي أخطأت في الإجابة عليها. لن تتذكر الأجوبة بهذه الطريقة. قد ترغب بتقديم الاختبار والامتحان النهائي مرتين أو ثلاث مرات. يمكنك عند حصولك على نتيجة ترتضيها أن تراجع الأجوبة لتختبر مكامن القوة والضعف في قدرتك المعرفية.

نقتـــرح عليك أن تنهي فصلاً واحداً في الأسبوع. دراسة ساعة أو ساعتين في اليوم كافية. لا تضغط على نفسك؛ أعط نفسك وقتاً لتفهّم المادة. ولكن لا تكن بطيئاً جداً. تقدم بخطى ثابتة ومستمرة. ستكمل بهـــذه الطـــريقة الدورة الدراسية في بضعة أشهر. (وهذا ما نتمناه، فلا بديل عن "عادات الدراسة الجيدة") يمكن عند إنهائك لهذه الدورة الدراسية أن تستخدم الكتاب مع فهرسه كمرجع دائم.

نرحب بالاقتراحات من أجل الإصدارات المستقبلية.

ستان جيبيليسكو

كلمات شكـــر

لقـــد تم إنـــشاء الـــصور الإيضاحية في هذا الكتاب باستخدام CorelDRAW. تم استخدام بعض القـــصاصات الفنية بإذن من شركة كوريل (Corel Corporation, 1600 Carling Avenue, Ottawa Ontario, Canada K1Z8R7).

أقدم شكري إلى ماري كاسر (Mary Kaser)، التي ساعدتنا في تحرير هذا الكتاب.

الباب صفر

مراجعة للرياضيات

الفصل 1

المعادلات، والصيغ، والأشعة

المعادلة هي عبارة رياضية تحتوي على طرفين، أحدهما في الجانب الأيسر لإشارة المساواة (=) والطرف الآخر في الجانب الأيمن لإشارة المساواة. الصيغة هي معادلة تُستخدم بهدف استنتاج قيمة معينة أو لحل مسألة عملية. الشعاع هو نوع كمي خاص يتكون من مُركّبتين: الطويلة والاتجاه. تُستخدم المعادلات، والصيغ، والأشعة في الفيزياء. والآن دعنا نغوص بها فلِمَ التردد؟ لن تغرق في هذه المادة. إن كل ما تحتاج إليه هو قليل من المثابرة من الطراز القديم.

التدوين

يمكن أن تحتوي المعادلات والصيغ على مُعاملات (أعداد معينة)، وثوابت (كميات معينة ممثلة بحروف أبجدية)، و/أو متحولات (عبارات ترمز إلى أعداد غير محددة). يمكن استخدام أي من العمليات الحسابية العامة في المعادلة أو الصيغة. يتضمن ذلك الجمع، والطرح، والضرب، والقسمة، والرفع إلى قوة. تُستخدم التوابع أيضاً في بعض الأحيان، كالتوابع اللوغاريتمية، والتوابع الأسية، والتوابع المثلثية أو التوابع الأكثر تعقيداً.

يُمثّل الجمع بإشارة الجمع (+). ويمثل الطرح بإشارة الطرح (−). يُمثّل الضرب إما بإشارة الضرب بعد تدويرها بمقدار 45 درجة (×) أو بوضع الأعداد ضمن أقواس وكتابتها الواحد تلو الآخر. يجري تمثيل الضرب الذي تساهم فيه المُعاملات، ومتحول أو عدة متحولات، أو الثوابت بكتابة المُعامل متبوعاً بالمتحولات أو الثوابت دون أي رموز بينها. تُمثّل القسمة بشرطة مباشرة (/) وبحيث يكون المقسوم إلى يسارها والمقسوم عليه إلى يمينها. يُستخدم خط أفقي لتمثيل القسمة في العبارات المعقدة بحيث يكون المقسوم (البسط أو الصورة) في الأعلى والمقسوم عليه (المقام أو المخرج) في الأسفل. يُمثّل الأس (الرفع إلى قوة) بكتابة قيمة الأساس متبوعةً بكتابة قيمة الأس بشكل مرتفع والذي يُشير للقوة التي جرى رفع الأساس إليها. هذه بعض الأمثلة:

اثنان مضاف لها ثلاثة	2+3
أربعة مطروح منها سبعة	4-7
اثنان ضرب خمسة	2×5 أو (2)(5)
اثنان ضرب x	$2x$
اثنان ضرب $(x+4)$	$2(x+4)$
اثنان مقسومة على x	$2/x$
اثنان مقسومة على $(x+4)$	$2/(x+4)$
ثلاثة قوة أربعة	3^4
x قوة أربعة	x^4
$(x+3)$ قوة أربعة	$(x+3)^4$

بعض المعادلات البسيطة

هذه بعض المعادلات البسيطة التي تحتوي فقط على أعداد. لاحظ أنها صحيحة

$$3 = 3$$

$$3 + 5 = 4 + 4$$

$$1,000,000 = 10^6$$

$$-(-20) = 20$$

سترى من وقت لآخر معادلات تحتوي على أكثر من إشارة مساواة وتحتوي على ثلاثة أطراف أو أكثر. وهذه أمثلة على ذلك

$$3 + 5 = 4 + 4 = 10 - 2$$

$$1,000,000 = 1,000 \times 1,000 = 10^3 \times 10^3 = 10^6$$

$$-(-20) = -1 \times (-20) = 20$$

من الواضح أن جميع المعادلات السابقة صحيحة؛ حيث يمكنك اختبار ذلك بسهولة كبيرة. ولكن تحتوي بعض المعادلات على متحولات وتحتوي كذلك على أعداد. تكون هذه المعادلات صحيحة فقط عندما يكون لهذه المتحولات قيم معينة؛ في بعض الأحيان لا تكون المعادلة صحيحة أياً تكن القيم التي يمكن أن تأخذها المتحولات. هذه بعض المعادلات التي تحتوي على متحولات

$$x + 5 = 8$$

$$x = 2y + 3$$

$$x + y + z = 0$$
$$x^4 = y^5$$
$$y = 3x - 5$$
$$x^2 + 2x + 1 = 0$$

تُمثّل المتحولات عادةً بحروف صغيرة مائلة تقع في نهاية مجموعة الحروف الأبجدية.

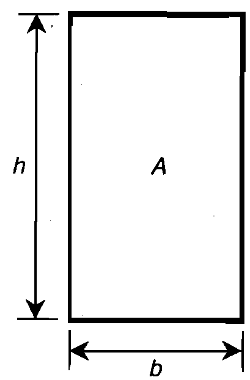
قــد يجري الخلط بين الثوابت والمتحولات في حال عدم وجود نص داعم يشير إلى ما يرمز الرمز إليه ويحدد الوحدات المساهمة. تُمثّل الثوابت عادةً بحروف واقعة في النصف الأول من مجموعة الحروف الأبجدية. المــثال الشائع هو c والذي يرمز إلى سرعة الضوء في الفراغ الحر (والتي تساوي تقريباً 299,792 إذا عبرنا عــنها بالكيلومتر بالثانية، و299,792,000 إذ عبّرنا عنها بالمتر بالثانية). المثال الآخر هو e، الثابت الأسي والذي يساوي 2.71828 *تقريباً*.

بعض الصيغ البسيطة

نقوم في الصيغ دائماً تقريباً بوضع الكمية المراد تحديدها كمتحول في الطرف الأيسر لإشارة المساواة ووضــعها في بعــض العبارات الرياضية في الطرف الأيمن. من المهم عند التعبير عن الصيغة بالرموز تعريف جميع الثوابت والمتحولات بحيث يعرف القارئ مكان استخدام هذه الصيغة وماذا تمثل جميع الكميات.

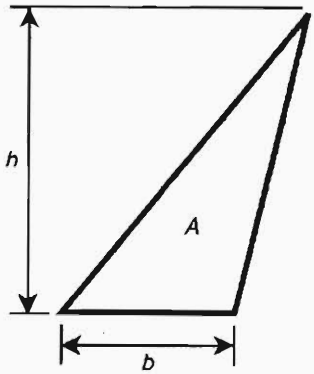
إحدى أكثر الصيغ بساطة وشهرة هي صيغة إيجاد مساحة المستطيل (الشكل (1-1)). ليكن b ممثلاً لقاعــدة المــستطيل (بالأمتار)، وh ممثلاً للارتفاع (بالأمتار) مقاساً بشكل عامودي على القاعدة. ستكون عندها مساحة المستطيل A (بالأمتار المربعة):

$$A = bh$$



الشكل (1-1): مستطيل بقاعدة طولها b، وارتفاع طوله h، ومساحة A.

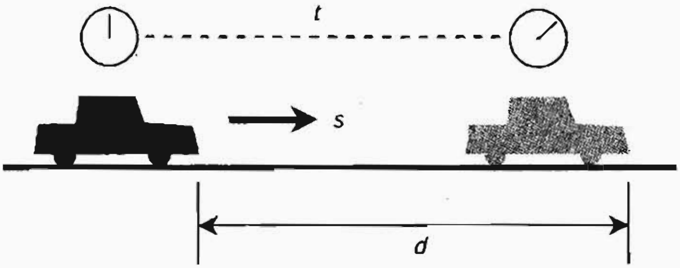
تــوجد صــيغة مشابهة تتيح لنا حساب مساحة المثلث (الشكل (1-2)). ليكن b ممثلاً لطول قاعدة المــثلث (بالأمتار)، وليكن h ممثلاً للارتفاع (بالأمتار) مقاساً بشكل عامودي على القاعدة. ستكون عندها مساحة المثلث A (بالأمتار المربعة) هي:



الشكل (1-2): مثلث بقاعدة طولها b، وارتفاع طوله h، ومساحة A.

$$A = bh/2$$

لنأخذ بعين الاعتبار الصيغة المتعلقة بالمسافة المقطوعة كتابع للسرعة والزمن. لنفترض أن السيارة تسير بسرعة ثابتة s (بالأمتار بالثانية) على طريق عام مستقيم (الشكل (1-3)). ليكن الحرف t ممثلاً لفترة زمنية معينة (بالثواني). ستعطى المسافة d التي تقطعها السيارة في هذه الفترة الزمنية (بالأمتار) بالصيغة



الشكل (1-3): سيارة تسير على طريق عام مستقيم مسافة d بسرعة ثابتة s لفترة زمنية t

$$d = st$$

ستلاحظ إذا كنت ذكياً أمراً مشتركاً بين الصيغ الثلاث السابقة: وهو "توافق" جميع الوحدات مع بعضها. تُعطى المسافات دائماً بالأمتار، ويُعطى الزمن بالثواني، وتُعطى السرعة بالأمتار بالثانية. لن تعمل صيغ المساحة السابقة كما هو موضح إذا جرى التعبير عن A بالبوصة المربعة وعن d بالقدم. ولكن، يمكن تحويل الصيغ بحيث تكون قانونية بالنسبة لهذه الوحدات. يتطلب ذلك إدخال ثوابت تعرف بعوامل التحويل.

عوامل التحويل

عُد ثانية إلى الشكل (1-1). افترض أنك ترغب بمعرفة المساحة A بالبوصة المربعة بدلاً من المتر المربع. للحصول على هذا الجواب، يجب أن تعلم كم يضم المتر المربع الواحد من البوصات المربعة. يوجد حوالي 1,550 بوصة مربعة في المتر المربع الواحد. لذا يمكننا إعادة صياغة الصيغة في الشكل (1-1) على

الـــشكل الـــتالي: ليكن b ممثلاً لطول قاعدة المستطيل (بالأمتار)، وليكن h ممثلاً لارتفاع المستطيل بالأمتار مقاساً بشكل عامودي على القاعدة. ستكون عندها مساحة المستطيل A (بالبوصة المربعة) هي:

$$A = 1{,}550\ bh$$

انظر مرة أخرى إلى الشكل (1-2). افترض أنك تريد أن تعرف المساحة بالبوصة المربعة عندما يجري التعـــبير عن طول قاعدة المثلث وارتفاعه بالقدم. يوجد بالضبط 144 بوصة مربعة في القدم المربع الواحد، وبالتالي يمكننا إعادة صياغة الصيغة في الشكل (1-2) على الشكل التالي: ليكن b ممثلاً لطول قاعدة المثلث (بالقـــدم)، ولـــيكن h ممثلاً لارتفاع المثلث (بالقدم) مقاساً بشكل عامودي على القاعدة. ستكون عندها مساحة المثلث A (بالبوصة المربعة)هي:

$$A = 144\ bh/2$$
$$= (144/2)\ bh$$
$$= 72\ bh$$

انظـــر مرة أخرى إلى الشكل (1-3). افترض أنك تريد أن تعرف المسافة التي قطعتها السيارة بالميل عـــند التعبير عن السرعة بالقدم بالثانية وعن الزمن بالساعة. لتمثيل ذلك، يجب أن تعرف العلاقة بين الميل بالـــساعة والقدم بالثانية. لتحويل قدم بالثانية بشكل تقريبي إلى ميل بالساعة، من الضروري الضرب بالعدد 0.6818. وســـتكون الوحدات عندها متوافقة مع بعضها: ستكون المسافة بالميل، والسرعة بالميل بالساعة، وسيكون الزمن بالساعة. يمكن إعادة كتابة الصيغة في الشكل (1-3) على الشكل التالي: افترض أن السيارة تـــسير بسرعة ثابتة s (بالقدم بالثانية) على طريق عام مستقيم (راجع الشكل (1-3)). ليكن t ممثلاً لفترة زمنية معينة (بالساعة). ستعطى عندها المسافة d التي قطعتها السيارة (بالميل) في الفترة الزمنية بالصيغة

$$d = 0.6818\ st$$

يمكنك الحصول على عوامل التحويل هذه بسهولة. إن كل ما تحتاجه هو أن تعرف عدد البوصات في المتـــر، وعـــدد البوصات في القدم، وعدد الأقدام في الميل، وعدد الثواني في الساعة. قد تقوم بإجراء هذه الحـــسابات بنفـــسك كتمـــرين. ولكن قد ترغب بالحصول على عوامل التحويل بدقة أكبر من الدقة التي قدمناها هنا.

لا تكـــون عـــوامل التحويل مباشرة دائماً. لحسن الحظ، تزخر قواعد البيانات بعوامل تحويل لجميع الأنواع وهي مسرودة في الجداول. ليس مطلوباً منك تذكر الكثير من البيانات، فببساطة يمكنك البحث عن عوامل التحويل التي تحتاجها. تشكل الإنترنت مزوداً كبيراً بهذا النوع من المعلومات. وفّر موقع الوب التالي في زمن كتابة هذا الكتاب قاعدة بيانات معرفية خاصة بتحويل الوحدات الفيزيائية.

http://www.physics.nist.gov/Pubs/SP811/appenB8.html

إذا كنت من مستخدمي الوب بشكل كبير، فأنت تعرف أن *URL* يتغيّر دائماً. إذا لم يرشدك *URL* الـــسابق إلى عـــوامل التحويل، وجّه مستعرضك إلى صفحة البدء للمعهد الوطني للمقاييس والتكنولوجيا

‏(*NIST*) وابحث في الموقع عن جداول عوامل التحويل:

http://www.nist.gov

إذا بدا الأسلوب الذي جرى التعبير به عن الوحدات في مواقع الوب الأكاديمية غير قابل للفهم، فلا تقلــق. ســتعود على التدوين العلمي بتقدم دراستك في هذا الكتاب، وسترتقي العبارات من العسيرة إلى السهلة.

معادلات الدرجة الأولى متحول واحد

درجــت العــادة في الجبر على تصنيف المعادلات وفقاً للأس الأكبر، أي القوة الأكبر التي تُرفع لها المــتحولات. تدعى *معادلة الدرجة الأولى متحول واحد* أيضاً *متحولاً واحداً بمعادلة الدرجة الأولى*، ويمكن كتابتها بالشكل القياسي التالي:

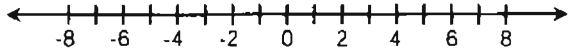
$$ax + b = 0$$

حيث إن a وb من الثوابت، وx متحول. يكون للمعادلات من هذا النوع دائماً حل بعدد حقيقي.

ما هو العدد الحقيقي؟

يمكــن بشكل غير رسمي تعريف *العدد الحقيقي* بأنه العدد الذي يظهر على *مستقيم الأعداد* (الشكل (1-4)). ســيدعو الرياضيون الأقحاح ذلك بالتبسيط الزائد، ولكننا هنا سنقوم بذلك. وهذه بعض الأمثلة عن الأعداد الحقيقية 0، و5، و7-، و22.55، والجذر التربيعي للعدد 2، وπ.

إذا كنت تتساءل عما يشبه العدد "غير الحقيقي"، خذ الجذر التربيعي للعدد 1-. ما هو العدد الحقيقي الذي إذا ضربته بنفسه حصلت على العدد 1-؟ لا يوجد عدد كهذا. سينتج عن تربيع أي عدد سالب عدد موجب؛ وسينتج عن تربيع أي عدد موجب عدد موجب أيضاً؛ وإنّ مربع العدد صفر هو صفر. إنّ الجذر التربيعي للعدد 1- موجود، ولكن في مكان آخر مختلف عن مستقيم الأعداد الموضح في الشكل (1-4).



الشكل (1-4): يمكن تمثيل الأعداد الحقيقية رسومياً كنقاط على خط مستقيم.

سنُعرّفك لاحقاً في هذا الفصل على *الأعداد التخيّلية والأعداد العقدية*، والتي تُعتبر بمعنى نظري معين "غير حقيقية". ولكن دعنا الآن نعود للمهمة التي بين أيدينا: وهي معادلات الدرجة الأولى بمتحول واحد.

بعض الأمثلة

تُعتــبر أي معادلة يمكن تحويلها إلى الشكل القياسي السابق معادلة من الدرجة الأولى بمتحول واحد. الأشكال البديلة هي

$$c\,x = d$$

$$x = m/n$$

حيث إن c، وd، وm، وn ثوابت و$n \neq 0$. هذه بعض الأمثلة عن معادلات الدرجة الأولى بمتحول واحد:

$$4x - 8 = 0$$

$$-\pi x = 22$$

$$3ex = c$$

$$x = \pi/c$$

في هذه المعادلات، يُدعى π، وe، وc *بالثوابت الفيزيائية* والتي تمثل نسبة محيط الدائرة إلى قطرها، وقاعدة الأس الطبيعي، وسرعة الضوء في الفضاء الحر، بالترتيب. لا يوجد وحدات للثوابت π وe. إنها أعداد صرفة وتدعى *بالثوابت عديمة البعد*:

$$\pi \approx 3.14159$$

$$e \approx 2.71828$$

تعني إشارة المساواة المعقوفة "مساوٍ تقريباً ل". لا يحمل الثابت c أي معنى إذا لم تحدّد الوحدات. يجب التعبير عنه بوحدات السرعة، كالميل بالثانية (mi/s) أو كيلومتر بالثانية (km/s):

$$c \approx 186{,}282\ mi/s$$

$$c \approx 299{,}792\ km/s$$

كيف تُحل

لحل معادلة بمتحول واحد، يجب في الحقيقة تحويلها إلى صيغة. يجب أن يظهر المتحول لوحده على الجانب الأيسر لإشارة المساواة ويجب أن تقتصر العبارة في الجانب الأيمن على عدد محدد. يوجد بعض التقنيات المستخدمة للحصول على العبارة المعبرة عن قيمة المتحول:

- إضافة الكمية نفسها إلى طرفي المعادلة.
- طرح الكمية نفسها من طرفي المعادلة.
- ضرب طرفي المعادلة بالكمية نفسها.
- قسمة طرفي المعادلة على الكمية نفسها.

يمكن أن تحتوي الكمية المساهمة في أي من هذه الإجرائيات على أعداد، وثوابت، ومتحولات؛ أي شيء. يوجد استثناء واحد: القسمة على صفر أو على أي مقدار يمكن أن يساوي الصفر تحت أي ظروف مستحيلة. إن سبب ذلك بسيط: القسمة على صفر غير معرّفة.

لنأخذ بعين الاعتبار المعادلات الأربع المذكورة في الفقرات السابقة ولنحلها. بسردها مرة أخرى:

$$4x - 8 = 0$$

$$-\pi x = 22$$

$$3ex = c$$

$$x = \pi/c$$

يجري حل المعادلة الأولى بإضافة 8 لكل طرف، ثم تقسيم طرفي المعادلة على 4:

$$4x - 8 = 0$$

$$4x = 8$$

$$x = 8/4 = 2$$

يجري حل المعادلة الثانية بتقسيم طرفي المعادلة على π، ثم ضرب طرفي المعادلة بالعدد 1−

$$-\pi x = 22$$

$$-x = 22/\pi$$

$$x = -22/\pi$$

$$x \approx -22/3.14159$$

$$x \approx -7.00282$$

يجـــري حـــل المعادلة الثالثة بالتعبير أولاً عن c (سرعة الضوء في الفضاء الحر) بالوحدات المناسبة، ثم بتقسيم كل من طرفي المعادلة على e (حيث إن $e \approx 2.71828$)، وفي النهاية تقسيم طرفي المعادلة على 3. دعنا نفترض أنه جرى تقدير c بالكيلو متر بالثانية؛ $c \approx 299{,}792$ km/s. ثم

$$3ex = c$$

$$(3 \times 2.71828)\, x \approx 299{,}792 \text{ km/s}$$

$$3x \approx (299{,}792/2.71828) \text{ km/s} \approx 110{,}287 \text{ km/s}$$

$$x \approx (110{,}287/3) \text{ km/s} \approx 36{,}762.3 \text{ km/s}$$

لاحـــظ أنه يجب أن تبقى الوحدات حاضرة في الذهن باستمرار. تتطلب هذه المعادلة وبشكل مختلف عن المعادلتين السابقتين، متحولاً له بُعد (السرعة).

لا تحتاج المعادلة الرابعة إلا لإجراء عملية القسمة في طرف المعادلة الأيمن. ولكن، الوحدات عويصة! خذ سرعة الضوء بالميل بالثانية في هذا المثال؛ $c \approx 186{,}282$ mi/s. ثم

$$x = \pi/c$$

$$x \approx 3.14159/(186{,}282 \text{ mi/s})$$

عند ظهور الوحدات في مقام (مخرج) العبارة الكسرية، كما هو موضح هنا، يجب قلبها، أي يجب أن

نأخذ مقلوب الوحدة المطلوبة. وذلك يعني تحويل ميل بالثانية إلى ثانية بالميل (*s/mi*). وذلك يقود إلى:

$$x \approx (3.14159/186,282)\ s/mi$$

$$x \approx 0.0000168647\ s/mi$$

لا يـــشكل ذلك طريقة عادية للتعبير عن السرعة، ولكن عند التفكير بذلك نجد أن له معنى. أيا يكن "الجسم x" فإنه يستغرق زمناً قدره $0.0000168647s$ للانتقال مسافة ميل واحد.

معادلات الدرجة الثانية متحول واحد

تدعـــى *معادلـــة الدرجة الثانية متحول واحد* أيضاً *متحولاً واحداً بمعادلة من الدرجة الثانية* أو غالباً بالمعادلة التربيعية، ويمكن كتابتها بالشكل القياسي التالي:

$$ax^2 + bx + c = 0$$

حيث إن a، وb، وc، ثوابت، وx متحول. (لا يرمز الثابت c هنا إلى سرعة الضوء). يمكن أن يكون لهـــذا النوع من المعادلات حلاّن بعددين حقيقيين، أو حل واحد بعدد حقيقي، أو يمكن أن لا يكون لهذا النوع حلول بأعداد حقيقية.

بعض الأمثلة

أي معادلة يمكن تحويلها إلى الشكل السابق هي معادلة تربيعية. الأشكال البديلة هي

$$m x^2 + nx = p$$

$$q x^2 = rx + s$$

$$(x + t)(x + u) = 0$$

حيث إن m، وn، وp، وq، وr، وs، وt، وu ثوابت. وهذه بعض الأمثلة عن المعادلة التربيعية:

$$x^2 + 2x + 1 = 0$$

$$-3x^2 - 4x = 2$$

$$4x^2 = -3x + 5$$

$$(x + 4)(x - 5) = 0$$

تحويلها إلى النموذج

تكـــون بعض المعادلات التربيعية سهلة الحل؛ ويكون بعضها الآخر صعب الحل. أياً تكن خطة الحل التي تعتزم تنفيذها، فإن خطة الحل الأولى هي إما بتحويل المعادلة إلى الشكل القياسي أو إلى شكل جداء مُعاملات.

المعادلة الأولى السابقة مكتوبة مسبقاً بالشكل القياسي. إنها جاهزة كي تحاول حلها للوصول إلى حل يبدو بسرعة أنه سهل.

يمكن تحويل المعادلة الثانية إلى الشكل القياسي بطرح 2 من طرفي المعادلة:

$$-3x^2 - 4x = 2$$

$$-3x^2 - 4x - 2 = 0$$

يمكن تحويل المعادلة الثالثة إلى الشكل القياسي بإضافة 3x إلى طرفي المعادلة، ثم طرح 5 من كل طرف:

$$4x^2 = -3x + 5$$

$$4x^2 + 3x = 5$$

$$4x^2 + 3x - 5 = 0$$

إنّ المعادلة الرابعة على شكل جداء عوامل. يفضّل العلماء والمهندسون هذا الشكل من المعادلات لإمكانية حلّها دون القيام بأي عمل. انظر إليها بإمعان:

$$(x + 4)(x - 5) = 0$$

تكون العبارة في الجانب الأيسر من إشارة المساواة صفراً إذا كان أي من العاملين صفراً. إذا كان $x = -4$، تصبح المعادلة

$$(-4 + 4)(-4 - 5) = 0$$

$$0 \times -9 = 0 \qquad \text{(الحل محقق)}$$

إذا كان $x = 5$، تصبح المعادلة

$$(5 + 4)(5 - 5) = 0$$

$$9 \times 0 = 0 \qquad \text{(الحل محقق)}$$

من السهل جداً "تخمين" قيم المتحولات التي تشكل حلول المعادلات التربيعية المكتوبة على شكل جداء عوامل. فقط خذ المعاكس الجمعي (السالب) للثوابت في كل عامل.

من الممكن وجود نقطة واحدة غامضة يجب توضيحها. افترض أن المعادلة التربيعية على الشكل:

$$x(x + 3) = 0$$

يمكن تصورها في هذه الحالة على الشكل:

$$(x + 0)(x + 3) = 0$$

ويمكنك مباشرة أن ترى أن الحلول هي $x = 0$ أو $x = -3$.

إذا كنت قد نسيت، فقد ذكرنا في بداية هذا القسم أنه قد يكون للمعادلة التربيعية حل واحد بعدد حقيقي. وهذا مثال عن معادلة مكتوبة على شكل جداء عوامل:

$$(x - 7)(x - 7) = 0$$

قد يقول الرياضيون شيئاً يؤثر في ذلك، نظرياً، إنّ لهذه المعادلة حلّين عدديين حقيقيين، وكلاهما يساوي 7. ولكن نقول في الفيزياء أن لهذه المعادلة حلاً عددياً حقيقياً واحداً هو 7.

الصيغة التربيعية

انظر مرة أخرى إلى المعادلتين الثانية والثالثة اللتين ذكرناهما سابقاً:

$$-3x^2 - 4x = 2$$

$$4x^2 = -3x + 5$$

وبتحويلهما إلى الشكل القياسي، نحصل على هاتين المعادلتين المكافئتين:

$$-3x^2 - 4x - 2 = 0$$

$$4x^2 + 3x - 5 = 0$$

قـــد تحدق في هاتين المعادلتين وقتاً طويلاً قبل أن تحصل على أفكار حول تحويلهما إلى جداء عوامل. وقـــد لا تحصل على حل. وفي النهاية قد تتساءل عن سبب هدرك للوقت. لحسن الحظ، توجد صيغة يمكن اســـتخدامها لحل المعادلات التربيعية في الحالة العامة. تستخدم هذه الصيغة "القوة العنيفة" بدلاً من البديهة التي يتطلبها عادةً جداء العوامل.

خذ بعين الاعتبار مرة أخرى معادلة الدرجة الثانية بمتحول واحد:

$$ax^2 + bx + c = 0$$

يمكن إيجاد الحل (الحلول) لهذه المعادلة باستخدام هذه الصيغة:

$$x = [-b \pm (b^2 - 4ac)^{1/2}]/2a$$

يوجد نقطتان يجب توضيحهما هنا. الأولى هي الرمز ±. يُقرأ هذا الرمز "زائد أو ناقص" وهذه طريقة لـــدمج العبارتين الرياضيتين في عبارة واحدة. إنها شكل مكافئ لضغط البيانات في الكمبيوتر. عندما تمدد "المعادلة المضغوطة" السابقة فإننا نحصل على معادلتين منفصلتين

$$x = [- b + (b^2 - 4ac)^{1/2}]/2a$$

$$x = [-b - (b^2 - 4ac)^{1/2}]/2a$$

الـــنقطة الثانية التي يجب توضيحها هي الأس الكسري. ذلك ليس خطأ مطبعياً، إن ذلك يعني حرفياً القـــوة ½، وهـــي طـــريقة أخـــرى للتعبير عن الجذر التربيعي. من الواضح أنه من السهل بالنسبة لبعض الأشـــخاص كتابة القوة ½ بدلاً من كتابة إشارة الجذر. بشكل عام، يمكن كتابة الجذر النوني للعدد على شـــكل قـــوة $1/z$. ذلـــك صحيح ليس فقط لقيم العدد z بل أيضاً لجميع القيم المحتملة للعدد z باستثناء الصفر.

الإدخال

افحص هذه المعادلة مرة أخرى

$$-3x^2 - 4x - 2 = 0$$

المُعاملات هي:

$$a = -3$$

$$b = -4$$

$$c = -2$$

ينتج عن إدخال هذه الأعداد في الصيغة التربيعية

$$x = \{\, 4 \pm [(-4)^2 - (4 \times -3 \times -2)]^{\frac{1}{2}}\}/(2 \times -3)$$

$$= 4 \pm (16 - 24)^{\frac{1}{2}}/-6$$

$$= 4 \pm (-8)^{\frac{1}{2}}/-6$$

لقد جوبهنا في هذا الحل بالجذر التربيعي للعدد 8-. إنه شكل من أشكال الأعداد "غير الحقيقية" التي حذرنا منها سابقاً.

هذه الأعداد "غير الحقيقية"

يرمز الرياضيون إلى الجذر التربيعي للعدد 1-، ويدعى *وحدة الأعداد التخيلية*، بالحرف الصغير المائل i. ويرمز العلماء والمهندسون عادةً له بالحرف j، ولذا سنقوم بذلك.

يمكن الحصول على أي عدد تخيلي بضرب j بعدد حقيقي ما q. يُكتب العدد الحقيقي q عادةً بعد j وذلــك إذا كان q موجباً أو صفراً. إذا كان q عدداً حقيقياً سالباً، تكتب القيمة المطلقة للعدد q بعد $-j$. تشكل الأعداد $j3$، و$-j5$، و$j2.787$، و$-j\pi$ أمثلة عن الأعداد التخيلية.

يمكــن تمثيل مجموعة الأعداد التخيلية على مستقيم الأعداد، كما مثلنا الأعداد الحقيقية. إن مستقيم الأعــداد الحقيقــية ومستقيم الأعداد التخيلية متطابقان في المعنى كالتوأم. وكما في التوائم البشرية، وعلى الرغم من أنهما يبدوان متشابهين، إلا أنهما مستقلان. يوجد لمجموعتي الأعداد التخيلية والحقيقية قيمة واحدة مشتركة وهي الصفر. بالنتيجة

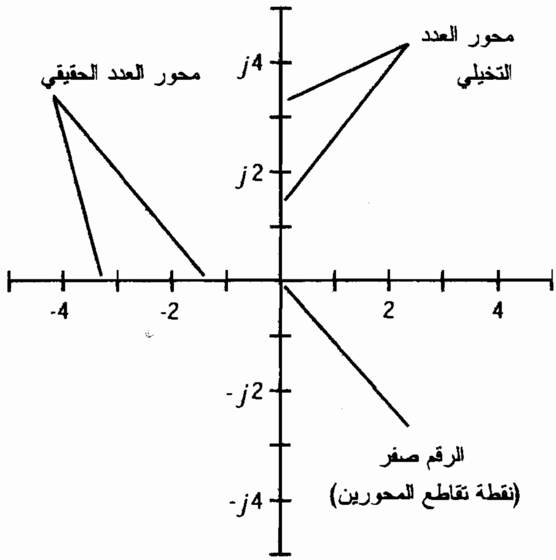
$$j0 = 0$$

يتكون العدد العقدي من مجموع عددين حقيقي وتخيلي! الشكل العام للعدد العقدي k هو

$$k = p + jq$$

حيث إنّ p وq أعداد حقيقية.

يــشير الرياضــيون، والعلماء، والمهندسون لمجموعة الأعداد العقدية بوضع الأعداد الحقيقية والأعداد التخيلــيّة علــى محورين بحيث يشكلان فيما بينهما زاوية قائمة ويتقاطعان عند الرقم الصفر. النتيجة هي مــستوى إحداثــيات متعامدة (الشكل (1-5)). إن كل نقطة في هذا المستوى تقابل عدداً عقدياً واحداً؛ وكل عدد عقدي يقابل نقطة واحدة في المستوى.



الشكل (1−5): يمكن تمثيل الأعداد العقدية رسومياً كنقاط في المستوى، محددة بواسطة مستقيمي أعداد بينهما زاوية قائمة.

بما أنك تعرف الآن القليل عن الأعداد العقدية، ربما ترغب بدراسة الحلِ السابق وتبسيطه. تذكر أنه يحتوي $(-8)^{1/2}$. سيكتب المهندس أو الفيزيائي ذلك على الشكل $j8^{1/2}$ لذا فحلُ المعادلة التربيعية هو

$$x = 4 \pm j\,8^{1/2}/-6$$

عودة إلى "الحقيقة"

انظر مرة أخرى إلى هذه المعادلة

$$4x^2 + 3x - 5 = 0$$

هنا المعاملات هي

$$a = 4$$

$$b = 3$$

$$c = -5$$

يقود إدخال المُعاملات في الصيغة التربيعية

$$x = \{-3 \pm [3^2 - (4 \times 4 \times -5)]^{1/2}\}/(2\times4)$$

$$= -3 \pm (9 + 80)^{1/2}\}/8$$

$$= -3 \pm (89)^{1/2}/8$$

إنّ الجذر التربيعي للعدد 89 هو عدد حقيقي ولكنه مزعج. عند التعبير عنه بالشكل العشري ترى أنه غير منته وغير دوري. يمكن تقريبه، ولكن لا يمكن كتابته بدقة. تكون قيمته بتقريبه إلى أربع خانات 9.434. وبالنّتيجة

$$x \approx -3 \pm 9.434/8$$

تابع العمل إذا رغبت بالحصول على عددين صرفين دون القيام بأي عمليات جمع أو طرح أو قسمة. ولكن، من المهم فهم إجرائية الحصول على الحل. إذا كانت هذه المسألة تربكك، نفضل أن تراجع بعض الأقسام السابقة مرة أخرى وأن لا تزعج نفسك بإجراء العمليات الحسابية التي تستطيع الآلة الحاسبة القيام بها دون ذكاء.

المعادلات من الدرجة الأعلى بمتحول واحد

عندما تصبح الأسس في المعادلات بمتحول واحد أكبر وأكبر، يصبح إيجاد الحلول عملاً صعباً وأكثر تعقيداً. قديماً، ساهمت البصيرة، والتخمين، والعمل المضجر في حل معادلات كهذه. اليوم، يساعد الكمبيوتر العلماء عند مواجهة مسائل تحتوي على معادلات بمتحولات مرفوعة لقوى كبيرة عبر خيار العمل المكثف. سنُعرِّف *المعادلات التكعيبية*، و*المعادلات الرباعية*، و*المعادلات الخماسية*، و*المعادلات من الدرجة* - n ولكن سنترك إجرائيات الحل لكتب متقدمة في الرياضيات البحتة.

المعادلة التكعيبية

تدعى *المعادلة التكعيبية* أيضاً *بمعادلة الدرجة الثالثة بمتحول واحد* أو *متحولاً واحداً بالمعادلة من الدرجة الثالثة* ويمكن كتابتها بالشكل القياسي التالي:

$$ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$$

حيث إن a، وb، وc، وd ثوابت، وx متحول. (لا يرمز c هنا إلى سرعة الضوء في الفضاء الحر بل يمثل ثابتاً عاماً). إذا كنت محظوظاً، ستكون قادراً على تحويل معادلة كهذه إلى جداء عوامل لإيجاد الحلول الحقيقية r، وs، وt:

$$(x - r)\ (x - s)\ (x - t) = 0$$

لا تعتمد على قدرتك على تحويل هذه المعادلة إلى جداء عوامل. يكون ذلك سهلاً في بعض الأحيان ولكنّ عملية التحويل إلى جداء عوامل عادةً بالغة الصعوبة وطويلة.

المعادلة الرباعية

تدعى *المعادلة الرباعية* أيضاً *بمعادلة الدرجة الرابعة بمتحول واحد* أو *بالمعادلة من الدرجة الرابعة بمتحول واحد*، ويمكن كتابتها على الشكل القياسي التالي:

$$ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e = 0$$

حيث إن a، وb، وc، وd، وe ثوابت، وx متحول. (لا يرمز c هنا لسرعة الضوء في الفضاء الحر، ولا يرمز e للقاعدة الأسية، بل تمثل هذه الحروف ثوابت عامة في هذا السياق). هناك إمكانية ضئيلة لتحويل معادلة كهذه إلى جداء عوامل بهدف إيجاد الحلول الحقيقية r، وs، وt، وu:

$$(x-r)(x-s)(x-t)(x-u)=0$$

ستكون محظوظا كما في المعادلة التكعيبية إذا استطعت تحويل المعادلة الرباعية إلى جداء عوامل؛ وبالتالي إيجاد أربعة حلول حقيقية بسهولة.

المعادلة الخماسية

تدعى *المعادلة الخماسية* أيضاً *بمعادلة الدرجة الخامسة بمتحول واحد* أو *بالمعادلة من الدرجة الخامسة بمتحول واحد*، ويمكن كتابتها على الشكل القياسي التالي:

$$ax^5+bx^4+cx^3+dx^2+ex+f=0$$

حيث إن a، وb، وc، وd، وe، وf ثوابت، وx متحول. (لا يرمز c هنا لسرعة الضوء في الفضاء الحر، ولا يرمز e للقاعدة الأسية، بل تمثل هذه الحروف ثوابت عامة في هذا السياق). إن إمكانية حل المعادلة الخماسية وتحويلها إلى جداء عوامل هي إمكانية ضئيلة وإذا حدث ووجد خمسة حلول حقيقية r، وs، وt، وu وv:

$$(x-r)(x-s)(x-t)(x-u)(x-v)=0$$

ستكون عندها محظوظاً كما في المعادلة التكعيبية والرباعية إذا استطعت تحويل المعادلة الخماسية إلى جداء عوامل. ينخفض "عامل الحظ" بزيادة قوة أو درجة المعادلة.

المعادلة من الدرجة n

يمكن كتابة المعادلة من الدرجة n بمتحول واحد على الشكل القياسي التالي:

$$a_1x^n+a_2x^{n-1}+a_3x^{n-2}+\ldots+a_{n-2}x^2+a_{n-1}x+a_n=0$$

حيث إن a_1، a_2، ...، a_n ثوابت، وx متحول. لن نفكر مطلقاً في الحالة العامة بمحاولة تحويل هذه المعادلة إلى جداء عوامل، ولكن توجد بعض الحالات الخاصة التي تقود لعملية تحويل كهذه. يتطلب حل معادلات كهذه استخدام الكمبيوتر أو عملاً مضنياً جداً.

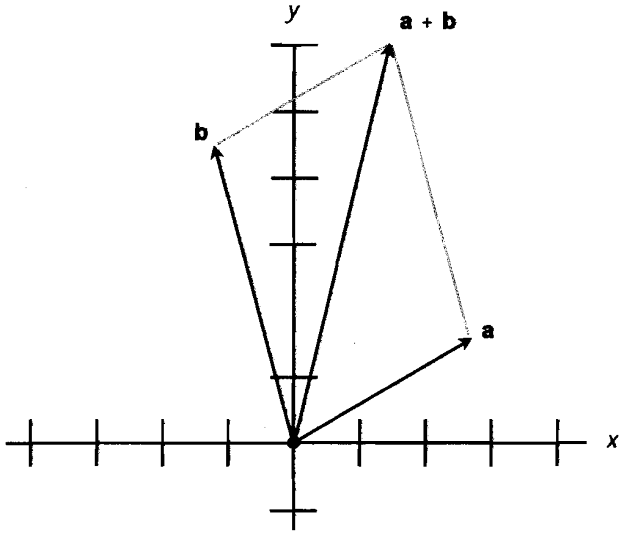
الحساب الشعاعي

كما ذكرنا في بداية هذا الفصل، يمتلك الشعاع خاصتين متغيرتين مستقلتين: الطويلة والاتجاه. تُستخدم الأشعة بشكل عام في الفيزياء لتمثيل ظواهر كالقوة، وشعاع السرعة، والتسارع. في المقابل، تدعى الأعداد الحقيقية بالسُلّميات، وهي أحادية البعد (يمكن تمثيلها أو رسمها على المحور)؛ أي لها طويلة فقط. تُعتبر السُلّميات كافية لتمثيل كميات أو ظواهر كالحرارة، والزمن، والكتلة.

الأشعة في ثنائي الأبعاد

هــل تتذكــر الإحداثيات المتعامدة، هل تتذكر المستوى xy في محاضرات الجبر في مدرستك العليا؟ يدعــى ذلك في بعض الأحيان بالمستوى الديكارتي (نسبة إلى الرياضي ديكارت). تخيل وجود شعاعين في ذلــك المستوى. سمِّهما **a** و**b**. (تُكتب الأشعة عادةً بخط عريض بشكل مختلف عن المتحولات، والثوابت، والمُعــاملات والتي تُكتب عادةً بخط مائل). يمكن أن نشير إلى هذين الشعاعين كشعاعين ينطلقان من المبدأ $(0,0)$ إلى نقاط أخرى في المستوى. يوضح الشكل (1-6) تمثيلاً بسيطاً لهما.

افترض أن لنقطة النهاية للشعاع **a** القيمة (x_a, y_a) ولنقطة النهاية للشعاع **b** القيمة (x_b, y_b). تكتب طويلة **a** على الشكل $|\mathbf{a}|$، وتعطى



الشكل (1-6): الأشعة في المستوى xy المتعامد.

$$|\mathbf{a}| = (x_a^2 + y_a^2)^{½}$$

يكون مجموع الشعاعين **a** و**b**

$$\mathbf{a} + \mathbf{b} = [\ (x_a + x_b), (y_a + y_b)]$$

يمكن إيجاد هذا المجموع هندسياً ببناء متوازي أضلاع بحيث يشكل **a** و**b** ضلعين متجاورين، وبالتالي يكون المجموع **a + b** هو قطر متوازي الأضلاع.

ويكون *الجداء السُّلمي* للشعاعين **a** و**b** عدد حقيقي ويعطى بالصيغة

$$\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b} = x_a x_b + y_a y_b$$

يدعى *الجداء المتصالب* أيضاً *بالجداء الشعاعي*، ويكتب على الشكل **a × b**، ويكون الجداء الشعاعي

للشعاعين **a** و **b** شعاعاً عامودياً على المستوى المحدد بالشعاعين **a** و **b**. افترض أن الزاوية بين الشعاعين **a** و **b**، مقاســة بعكس عقارب الساعة (من نقطة مراقبة خاصة بك) في المستوى الذي يحوي كلا الشعاعين، ولنسمِّها q. وبالتالي يتجه **a × b** باتجاهك وتعطى طويلته بالصيغة

$$|\mathbf{a} \times \mathbf{b}| = |\mathbf{a}|\ |\mathbf{b}|\ \sin q$$

الأشعة في فضاء ثلاثي الأبعاد

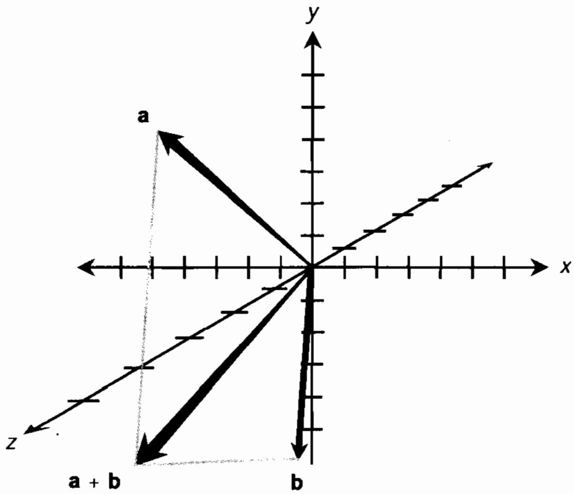
والآن وسّــع مداركك إلى فضاء ثلاثي الأبعاد. يدعى الفضاء xyz أيضاً *بالفضاء الديكارتي الثلاثي*، يمكن رسم شعاعين **a** و **b** كأشعة من المبدأ $(0,0,0)$. يوضح الشكل (1-7) رسما توضيحياً مبسطاً.

افترض أن لنقطة النهاية للشعاع **a** القيمة (x_a, y_a, z_a) ولنقطة النهاية للشعاع **b** القيمة (x_b, y_b, z_b). تُكتب طويلة الشعاع **a** على الشكل |**a**| وهي

$$|\mathbf{a}| = (x_a^2 + y_a^2 + z_a^2)^{½}$$

ويكون مجموع الشعاعين **a** و **b**

$$\mathbf{a} + \mathbf{b} = [\ (x_a + x_b), (y_a + y_b), (z_a + z_b)]$$



الشكل (1-7): الأشعة في الفضاء xyz ثلاثي الأبعاد.

يمكــن إيجــاد هذا المجموع هندسياً، كما في حالة الفضاء ثنائي الأبعاد، ببناء متوازي أضلاع يكون الشعاعان **a** و **b** ضلعيه المتجاورين. ويكون المجموع **a + b** قطر متوازي الأضلاع.

الجداء النقطي $\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b}$ للشعاعين **a** و **b** في الفضاء xyz هو عدد حقيقي يعطى بالصيغة

$$\boldsymbol{a} \cdot \boldsymbol{b} = x_a x_b + y_a y_b + z_a z_b$$

يعتبر الجداء المتصالب **a × b** للشعاعين **a** و **b** في الفضاء xyz معقد التصور قليلاً. إنه شعاع عامودي

على المستوى p الذي يحتوي على كل من الشعاعين **a** و **b**، والذي تعطى طويلته بالصيغة

$$|\mathbf{a} \times \mathbf{b}| = |\mathbf{a}|\,|\mathbf{b}|\, \sin q$$

حيث إن $\sin q$ هو جيب الزاوية q الواقعة بين الشعاعين **a** و **b** مقاسة في المستوى p. يكون اتجاه الشعاع **a × b** عامودياً على المستوى p. إذا نظرت إلى **a** و **b** من نقطة ما على المستقيم العامودي على المستوى p والذي يتقاطع مع المستوى p في المبدأ، وقمت بقياس الزاوية q بين الشعاعين **a** و **b** بعكس عقارب الساعة، فإن الجداء **a × b** سيتجه عندها باتجاهك.

بعض قوانين الأشعة

عندما نصل للقواعد، لا تتعدى الأشعة الأعداد العادية. هذه بعض القوانين التي تتبعها الأشعة.

الضرب بعدد سُلّمي

عـــند ضرب أي شعاع بعدد حقيقي، الذي يُدعى أيضاً بالعدد السُلّمي، يجري ضرب طويلة الشعاع (طوله) بذلك العدد السُلّمي. يبقى الاتجاه ثابتاً لا يتغيّر إذا كان العدد السُلّمي موجباً ولكن ينعكس الاتجاه إذا كان العدد السُلّمي سالباً.

تبديلية الجمع

عـــند جمـــع شـــعاعين، فليس هناك مشكلة في الترتيب الذي تجري فيه العملية. إذا كان **a** و **b** شعاعين فإن

$$\mathbf{a} + \mathbf{b} = \mathbf{b} + \mathbf{a}$$

تبديلية جداء شعاع - عدد سُلّمي

عند ضرب شعاع بعدد سُلّمي، فلا مشكلة في الترتيب الذي تجري فيه العملية. إذا كان **a** شعاعاً و k عدداً حقيقياً فإن

$$k\mathbf{a} = \mathbf{a}k$$

تبديلية الجداء النقطي

عند إجراء الجداء النقطي، فلا مشكلة في ترتيب الأشعة. إذا كان **a** و **b** شعاعين فإن

$$a \cdot b = \mathbf{b} \cdot \mathbf{a}$$

التبديلية السالبة للجداء المتصالب

ينعكس اتجاه الجداء المتصالب لشعاعين عند عكس ترتيب الشعاعين "المضروبين".

$$\mathbf{b} \times \mathbf{a} = -(\mathbf{a} \times \mathbf{b})$$

تجميعية الجمع

عند جمع ثلاثة أشعة، فلا مشكلة في كيفية تجميع الأشعة لإجراء الجمع. إذا كان **a** و**b** و**c** أشعة فإن

$$(\mathbf{a} + \mathbf{b}) + \mathbf{c} = \mathbf{a} + (\mathbf{b} + \mathbf{c})$$

تجميعية جداء شعاع - عدد سلّمي

ليكن **a** شعاعاً، وk_1 وk_2 عددين حقيقيين سلّميين. وبالتالي تنص المعادلة التالية على

$$k_1\,(k_2\mathbf{a}) = (k_1\,k_2)\,\mathbf{a}$$

توزيعية الجداء السلّمي على الجمع السلّمي

ليكن **a** شعاعاً وليكن k_1 وk_2 أعداداً حقيقية سُلّمية. وبالتالي تنص المعادلات التالية على:

$$(k_1 + k_2)\,\mathbf{a} = k_1\mathbf{a} + k_2\mathbf{a}$$

$$\mathbf{a}\,(k_1 + k_2) = \mathbf{a}k_1 + \mathbf{a}k_2 = k_1\mathbf{a} + k_2\mathbf{a}$$

توزيعية الجداء السلّمي على الجمع الشعاعي

ليكن **a** و**b** شعاعين، وليكن k عدداً حقيقياً سُلّمياً. وبالتالي تنص المعادلات التالية على:

$$k\,(\mathbf{a} + \mathbf{b}) = k\mathbf{a} + k\mathbf{b}$$

$$(\mathbf{a} + \mathbf{b})\,k = \mathbf{a}k + \mathbf{b}k = k\mathbf{a} + k\mathbf{b}$$

توزيعية الجداء النقطي على الجمع الشعاعي

ليكن **a** و**b** و**c** أشعة. وبالتالي تنص المعادلات التالية على:

$$\mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} + \mathbf{a} \cdot \mathbf{c}$$

$$(\mathbf{b} + \mathbf{c}) \cdot \mathbf{a} = \mathbf{b} \cdot \mathbf{a} + \mathbf{c} \cdot \mathbf{a} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} + \mathbf{a} \cdot \mathbf{c}$$

توزيعية الجداء المتصالب على الجمع الشعاعي

ليكن **a** و**b** و**c** أشعة. وبالتالي تنص المعادلات التالية على:

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \times \mathbf{b} + \mathbf{a} \times \mathbf{c}$$

$$\begin{aligned}(\mathbf{b} + \mathbf{c}) \times \mathbf{a} &= \mathbf{b} \times \mathbf{a} + \mathbf{c} \times \mathbf{a}\\ &= -(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) - (\mathbf{a} \times \mathbf{c})\\ &= -(\mathbf{a} \times \mathbf{b} + \mathbf{a} \times \mathbf{c})\end{aligned}$$

الجداء النقطي للجداء المتصالب

ليكن **a**، و**b**، و**c**، و **d** أشعة. وبالتالي تنص المعادلات التالية على:

$$(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{c} \times \mathbf{d}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})(\mathbf{b} \cdot \mathbf{d}) - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})(\mathbf{b} \cdot \mathbf{c})$$

هذه بعض الأمثلة التي تتبعها الأشعة بشكل عام. إذا كان لديك مشكلة في تصور كيفية عمل هذه القواعد بشكل مباشر، فأنت لست وحدك. يستحيل رؤية بعض مفاهيم الأشعة بالعين المجرّدة، لهذا لدينا الرياضيات. تتيح لنا المعادلات والصيغ كتلك المقدَّمة في هذا الفصل معالجة "المسائل الصعبة" التي تقع خارج خيالنا وتصورنا.

امتحان موجز

عـد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. إنّ المعادلة $(x-4)(x+5)(x-1) = 0$ هي مثال عن المعادلة
   (a) من الدرجة الأولى.
   (b) من الدرجة الثانية.
   (c) من الدرجة الثالثة.
   (d) من الدرجة الرابعة.
2. الأعداد الحقيقية التي تشكل حلول المعادلة في المسألة 1 هي
   (a) $-4, -5, -1$.
   (b) $4, -5, 1$.
   (c) لا يوجد أعداد حقيقية تشكل حلولاً لهذه المعادلة.
   (d) لا يوجد معلومات كافية لإيجاد الحلول.
3. افترض وجود شعاعين في المستوى xy كالتالي:

$$\mathbf{a} = (x_a, y_a) = (3, 0)$$
$$\mathbf{b} = (x_b, y_b) = (0, 4)$$

   ما هو طول مجموع هذه الأشعة؟
   (a) 5 وحدات.
   (b) 7 وحدات.
   (c) 12 وحدة.
   (d) لا يوجد معلومات كافية لإيجاد المجموع.

4. ليكن لدينا الشعاعان **a** و**b**، حيث يتجه **a** شرقاً، ويتجه **b** شمالاً. ما هو اتجاه **a . b**؟

(a) الشمال الشرقي.

(b) الخارج.

(c) الداخل.

(d) السؤال خطأ! الجداء النقطي ليس شعاعاً.

5. ليكن لدينا الشعاعان المذكوران في المسألة 4. ما هو اتجاه **a × b**؟

(a) الشمال الشرقي.

(b) الخارج.

(c) الداخل.

(d) سؤال خاطئ! الجداء المتصالب ليس شعاعاً.

6. عند تقسيم كل من طرفي المعادلة على كمية معينة، ما الذي يجب الحذر منه وتجنبه؟

(a) القسمة على ثابت.

(b) القسمة على متحول.

(c) القسمة على أي قيمة يمكن أن تبلغ الصفر.

(d) قسمة كل طرف على الكمية نفسها.

7. ليكن لدينا معادلة من الدرجة الثانية على الشكل $ax^2 + bx + c = 0$ حيث تملك المُعاملات التالية:

$a = 2$

$b = 0$

$c = 8$

ما الذي يمكن أن نقوله حول حلول هذه المعادلة؟

(a) أعداد حقيقية.

(b) أعداد تخيلية صرفة.

(c) أعداد عقدية.

(d) لا يوجد حلول لهذه المعادلة.

8. ليكن لدينا المعادلة $4x + 5 = 0$. ما هي الخطوة المنطقية الأولى في إجرائية حل هذه المعادلة.

(a) طرح 5 من كل طرف.

(b) قسمة كل طرف على x.

(c) ضرب كل طرف بالمتحول x.

(d) ضرب كل طرف بالعدد 0.

9. عند جمع الشعاعين **a** و**b**، ما هي العبارات التي تبقى صحيحة في كل الأحوال؟

(a) يكون الشعاع المُركّب دائماً أطول من **a** أو **b**.

(b) تكون جهة الشعاع المُركّب في الوسط بين **a** و**b**.

(c) يكون الشعاع المُركّب عامودياً على المستوى الذي يحوي **a** و**b**.

(d) ولا أي عبارة من العبارات السابقة.

10. إنّ المعادلة التي تضم متحولاً في الجانب الأيسر من إشارة المساواة ولها عبارة لا تحتوي على ذلك المتحول في الجانب الأيمن من إشارة المساواة وتُستخدم لتحديد كمية فيزيائية هي

(a) صيغة.

(b) معادلة من الدرجة الأولى.

(c) معاملة.

(d) ثابت.

الفصل 2

التدوين العلمي

الآن، وبعد أن أنعشت ذاكرتك عن كيفية معالجة الأعداد غير المحددة (المتحولات)، يجب أن تعرف التدوين العلمي، وهو الطريقة التي يعبر من خلالها الفيزيائيون والمهندسون عن مجال كبير من القيم التي يواجهونها. مثلاً كم ذرة يوجد على سطح الأرض؟ ما هي نسبة حجم كرة الدحل إلى حجم الشمس؟ يمكن تقريب هذه الأعداد بشكل جيد، ولكن يصعب التعامل معها بالشكل العشري العادي.

المحارف المرتفعة والمنخفضة

تُستخدم المحارف المنخفضة لتعديل معاني الوحدات، والثوابت، و المتحولات. يوضع الحرف المنخفض إلى يمين المحرف الرئيسي (بدون فراغ)، ويُضبط حجمه بنمط أصغر من نمط المحرف الرئيسي، ويوضع تحت السطر.

تُستخدم المحارف المرتفعة عادةً لتمثيل *الأسس* (رفع الكمية الأساس إلى قوة). تدل الحروف الإنكليزية الصغيرة والمكتوبة بخط مائل والواقعة في النصف الثاني من مجموعة الحروف الأبجدية (من n إلى z) على أسس المتحول. يوضع المحرف المرتفع إلى يمين المحرف الرئيسي (بدون فراغ) ويضبط بنمط أصغر من نمط المحرف الرئيسي ويوضع فوق السطر.

أمثلة عن المحارف المنخفضة

لا تُكتب المحارف العددية المنخفضة أبداً بخط مائل، بل تُكتب المحارف الأبجدية المنخفضة بخط مائل في بعض الأحيان. هذه ثلاثة أمثلة عن كميات تمثلها محارف منخفضة:

Z_o "تُقرأ زد منخفض صفر"؛ ترمز إلى الممانعة المُميِّزة لخط الإرسال.

R_{out} "تُقرأ أر منخفض أوت"؛ ترمز إلى مقاومة الخرج في دارة كهربائية.

y_n "تُقرأ واي منخفض أن"؛ تمثّل متحوّلاً.

قلّما تُكتب الأعداد العادية – إذا كُتبت – بشكل منخفض. من غير المتوقع رؤية عبارات كهذه:

$$3_5$$

$$-9.7755_{\pi}$$

$$-16_x$$

ولكن يمكن أن تُكتب الثوابت والمتحولات بأشكال "مختلفة". تُكتب بعض الثوابت الفيزيائية بشكل منخفض اصطلاحاً. مثلاً تمثل m_e كتلة الإلكترون في حالة السكون. قد ترغب بتمثيل النقاط في فضاء ثلاثي الأبعاد باستخدام ثلاثيات مرتبة على الشكل (x_1, x_2, x_3) بدلاً من الثلاثيات المرتبة على الشكل (x, y, z). يصبح هذا الشكل من الكتابة المنخفضة واضحاً وبشكل خاص إذا تحدثنا عن النقاط في فضاء ذي بعد أعلى، مثلاً تمثل $(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_{11})$ نقطة في الفضاء الديكارتي بأحد عشر بُعداً. يعتقد بعض علماء الفلك بوجود 11 بُعداً في كوننا، وربما أكثر، وبالتالي يوجد استخدامات حقيقية لتطبيقات الكتابة المنخفضة هذه.

أمثلة عن المحارف المرتفعة

لا تُكتب المحارف العددية المرتفعة أبداً بخط مائل، ولكن غالباً ما تُكتب المحارف الأبجدية بشكل مائل. هذه أمثلة لمقادير نمثلها بمحارف مرتفعة

2^3 تُقرأ "اثنان مُكعّب"؛ وتمثل $2\times 2\times 2$

e^x تُقرأ "e أس x"، وتمثل التابع الأسي للمتحول x

$Y^{½}$ تُقرأ "واي أس نصف"؛ وتمثل الجذر التربيعي للمتحول y

يوجد اختلاف كبير بين 2^3 و2! ويوجد أيضاً اختلاف في الكم والنوع بين العبارة e التي ترمز إلى قاعدة اللوغاريتم الطبيعي (تساوي تقريباً 2.71828) و e^x، والتي تمثل e مرفوعاً للقوة x والذي يستخدم في بعض الأحيان بدلاً من *التابع الأسي*.

يفضل العلماء والمهندسون التعبير عن القيم العددية الضخمة باستخدام التقنية الأسية المعروفة *بتدوين قوة العدد 10*. وهذا بالضبط ما عنيناه عندما تكلمنا عن التدوين العلمي.

الشكل القياسي

يُكتب العدد في *تدوين قوة العدد 10 القياسي* على الشكل:

$$m\,.\,n \times 10^z$$

حيث تمثل النقطة (.) فاصلة تُكتب على السطر (و لا تشير النقطة المرفوعة إلى الضرب) وتدعى *بالفاصلة الأساسية أو الفاصلة العشرية*. تكون القيمة m (على يسار الفاصلة العشرية) عدداً صحيحاً موجباً من المجموعة {1، 2، 3، 4، 5، 6، 7، 8، 9}. وتكون القيمة n (على يمين الفاصلة العشرية) عدداً

صحيحاً غير سالب من المجموعة {0، 1، 2، 3، 4، 5، 6، 7، 8، 9}. يمكن أن تكون القيمة z والتي تشكل قوة العدد 10، أي عدد صحيح: موجب، أو سالب، أو صفر. هذه بعض الأمثلة عن الأعداد المكتوبة بالتدوين العلمي القياسي:

$$2.56 \times 10^{6}$$

$$8.0773 \times 10^{-18}$$

$$1.000 \times 10^{0}$$

شكل بديل

طرأ تغيير طفيف على استخدام الموضوع السابق قبل منتصف القرن العشرين في بعض الدول وفي الكثير من الكتب والمحاضرات. يتطلب *التدوين البديل لقوة العدد 10* أن تكون $m = 0$. تظهر الكميات السابقة عند التعبير عنها بهذه الطريقة كأجزاء عشرية أكبر من 0 وأصغر من 1، وتزداد قيمة الأس بمقدار 1 مقارنة بالشكل القياسي:

$$0.256 \times 10^{7}$$

$$0.80773 \times 10^{-17}$$

$$0.1000 \times 10^{1}$$

تشكل هذه القيم، القيم الثلاث السابقة نفسها؛ الاختلاف الوحيد هو في كيفية التعبير عنها. إنها تشبه قول إننا نسير بسرعة 50.000 متر بالساعة بدل أن نقول إننا نسير بسرعة 50 كيلومتراً بالساعة.

"إشارة مضروباً في"

يمكن الإشارة إلى إشارة الضرب في عبارة تحتوي على قوة العدد 10 بطرق متنوعة. يستخدم معظم العلماء في أميركا رمز الضرب (×)، كما في الأمثلة السابقة. ولكن تُستخدم في بعض الأحيان نقطة صغيرة فوق السطر لتمثيل الضرب في تدوين قوة العدد 10. تبدو الأعداد السابقة عند كتابتها بهذه الطريقة على الشكل القياسي التالي:

$$2.56 \cdot 10^{6}$$

$$8.0773 \cdot 10^{-18}$$

$$1.000 \cdot 10^{0}$$

لا يجب الخلط بين هذه النقطة وبين الفاصلة العشرية في العبارة

$$m.n \cdot 10^{z}$$

حيث تمثل النقطة بين m و n فاصلة عشرية وتقع على السطر، بينما تمثل النقطة بين n و 10^{z} رمز الضرب وتُكتب فوق السطر. يُفضَّل رمز النقطة عند الحاجة للتعبير باستخدام الضرب عن أبعاد الوحدة

الفيزيائية. مثال على ذلك هو كيلوغرام بمتر على ثانية مربع والذي يرمز له $kg \cdot m/s^2$ أو $kg \cdot m \cdot s^{-2}$.

أمكـــن اســـتخدام الحرف الصغير x المكتوب بخط غير مائل للإشارة إلى الضرب عند استخدام الآلة الطابعـــة القديمة أو عند استخدام معالج كلمات يفتقر إلى مجموعة جيدة من الرموز. ولكن يمكن أن يسبب ذلـــك إرباكـــاً حيث نخطئ بالحرف x ونعتبره متحولاً. لذا تعتبر فكرة استخدام الحرف x في الحالة العامة "كإشـــارة مضروباً في" فكرة سيئة. البديل في هذه الحالة هو استخدام النجمة (*). هذا هو السبب في أنك سترى من حين لآخر أعداداً مكتوبة على الشكل

$$2.56*10^6$$

$$8.0773*10^{-18}$$

$$1.000*10^0$$

الأسس الصحيحة

قـــد تجـــد من حين لآخر أنه يتوجب عليك أن تعبر عن الأعداد المكتوبة بتدوين قوة العدد 10 باســـتخدام نـــص صرف غير منسق. يشكل إرسال المعلومات في نص رسالة بريد الكتروني مثالاً لهذه الحالـــة (بـــدلاً من استخدام الربط). يستخدم بعض الكمبيوترات والآلات الحاسبة هذا النظام. يشير الحرف E الكبير إلى العدد 10 مرفوعاً للقوة التي يمثلها العدد الذي يليه. تُكتب الكميات السابقة وفق هذا التنسيق على الشكل

2.56E6

8.0773E - 18

1.000E0

يُكـــتب الأس دائماً بعددين ويتضمن دائماً إشارة الجمع أو الطرح، وبالتالي تظهر العبارات السابقة على الشكل

2.56 E + 06

8.0773E - 18

1.000E + 00

النجمة هي البديل الآخر المستخدم لإشارة الضرب، ويستخدم الرمز ^ للإشارة للأس المرتفع بحيث تظهر العبارات السابقة على الشكل:

2.56*10^6

8.0773*10 ^ - 18

1.000*10^0

القيم العددية لجميع هذه الأمثلة متطابقة. إذا كُتبت بالشكل الكامل فهي بالترتيب

2,560,000

0.00000000000000000080773

1.000

المراتب

كما ترى، يتيح التدوين بقوة العدد 10 كتابة الأعداد التي تشير إلى الكميات الصغيرة أو الكبيرة التي لا يمكن تخيلها بسهولة.

$$2.55 \times 10^{45,589}$$

$$-9.8988 \times 10^{-7,654,321}$$

تخـيل كـتابة أي من هذه الأعداد بالشكل العشري العادي! في الحالة الأولى عليك كتابة العدد 255 متـبوعاً بسلـسلة محـارف مكونة من 45,587 صفراً. في الحالة الثانية، عليك أن تكتب إشارة الطـرح، ثم العـدد صـفر، ثم الفاصلة العشرية، ثم سلسلة محارف مكونة من 7,654,320 صفراً، ثم الأعداد 9، ثم 8، ثم 9، ثم 8، ثم 8.

ليكن لدينا الآن العددان التاليان

$$2.55 \times 10^{45,592}$$

$$-9.8988 \times 10^{-7,654,318}$$

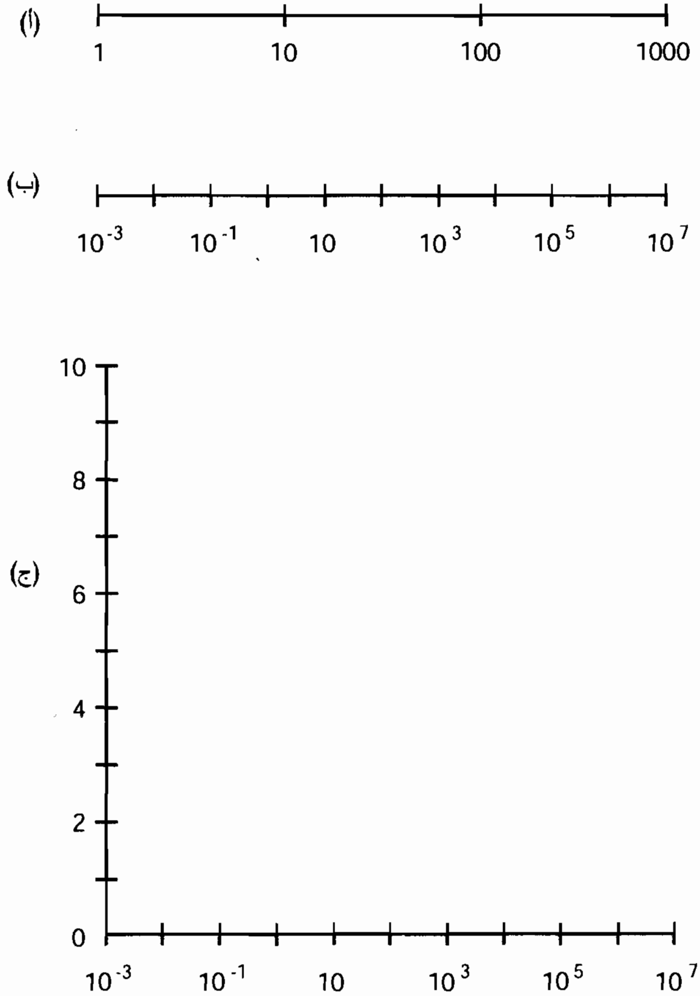
تبدو هذه الأعداد كسابقاتها أليس كذلك؟ ولكن كل من هذين العددين أكبر من العددين الأصليين بألف مرة. يمكن معرفة ذلك بالنظر إلى الأسس. كل من الأسين أكبر من سابقه بمقدار 3. العدد 45,592 أكبر من 45,589 بمقدار 3، والعدد 7,754,318− أكبر من 7,754,321− بمقدار 3 أيضاً. (تصبح الأعداد أكبر رياضياً عندما تصبح أكثر إيجابية أو أقل سلبية). الزوج الثاني من الأعداد أكبر بثلاث مراتب من زوج الأعداد الأول. تبدو هذه الأعداد متساوية تقريباً هنا وكانت ستبدو متطابقة لو أنها كتبت بالشكل العشري الكامل. ولكنها تختلف بدرجة اختلاف المتر عن الكيلو متر.

يتـيح مفهـوم المرتبة إمكانية بناء محاور الأعداد، والمخططات، والرسوم بمقاييس تغطي مجالات كـبيرة مـن القيم. يوضح الشكل (2-1) ثلاثة أمثلة. يوضح القسم (أ) محور أعداد مقسم إلى ثلاث مـراتب من 1 إلى 1,000. يوضح القسم (ب) محور أعداد مقسم إلى 10 مراتب، من 10^{-3} إلى 10^{7}. يوضـح القسم (ج) رسماً محوره الأفقي مقسم إلى 10مراتب من 10^{-3} إلى 10^{7}، ومحوره العامودي يمتد من 0 إلى 10.

سـتلاحظ إذا كنت ماهراً أن المقياس من 0 إلى 10 هو الأسهل تصوراً. وهو يغطي مراتب أكثر من أي مقايـيس أخرى: ويعود ذلك لعدم وجود مشكلة في عدد مرات تقسيم العدد غير المعدوم على عشرة، فمهما قمت بذلك فلن تبلغ الصفر أبداً.

بادئات المضاعفات

تستخدم بعض البادئات اللغوية، وتعرف *ببادئات المضاعفات* من قبل الفيزيائيين والمهندسين للتعبير عن المراتب. انتقل إلى الفصل السادس للحظة. يوضح الجدول (6-1) بادئات المضاعفات المستخدمة للعوامل التي تتراوح بين 10^{-24} إلى 10^{24}.



الشكل (2-1): (أ) محور أعداد مقسم إلى ثلاث مراتب.

(ب) محور أعداد مقسم إلى 10 مراتب.

(ج) نظام إحداثيات محوره الأفقي مقسم إلى 10 مراتب ويمتد محوره العامودي من 0 إلى 10.

قواعد للاستخدام

يستخدم التدوين بقوة العدد 10 بشكل عام في الأدب المكتوب فقط عندما تكون قوة العدد 10 كبيرة أو صغيرة. إذا كان الأس ضمن المجال من 2- إلى 2، تقضي القاعدة بكتابة الأعداد بشكلها العشري البحت. إذا كان الأس 3- أو 3، تُكتب الأعداد في بعض الأحيان بتدوين قوة العدد 10. تقضي القاعدة بالتعبير عن القيم بتدوين قوة العدد 10 إذا كان الأس 4- أو أصغر، أو إذا كان الأس 4 أو أكبر.

تقوم بعض الآلات الحاسبة المضبوطة على تدوين قوة العدد 10 بعرض جميع الأعداد وفق هذه الطريقة. قد يكون ذلك مربكاً، خاصة عندما تكون قوة العدد 10 صفراً والآلة الحاسبة معدة لعرض الكثير من الخانات. يفهم معظم المستخدمين العبارة 8.407 بسهولة أكبر من فهمهم للعبارة 8.407000000 E + 00، على الرغم من أن العبارتين تمثلان العدد نفسه.

دعنا الآن نرى كيفية العمل بالأعداد المكتوبة بتدوين قوة العدد 10 عندما نريد إجراء الحسابات البسيطة باستخدام الأعداد الكبيرة.

الجمع

إن أفضل طريقة لجمع الأعداد هي كتابة الأعداد بالشكل العشري إذا كان ذلك ممكناً. مثلاً،

$$(3.045 \times 10^5) + (6.853 \times 10^6) = 304,500 + 6,853,000$$
$$= 7,157,500$$
$$= 7.1575 \times 10^6$$

$$(3.045 \times 10^{-4}) + (6.853 \times 10^{-7}) = 0.0003045 + 0.0000006853$$
$$= 0.0003051853$$
$$= 3.051853 \times 10^{-4}$$

$$(3.045 \times 10^5) + (6.853 \times 10^{-7}) = 304,500 + 0.0000006853$$
$$= 304,500.0000006853$$
$$= 3.045000000006853 \times 10^5$$

الطرح

يتبع الطرح قواعد الجمع الأساسية نفسها:

$$(3.045 \times 10^5) - (6.853 \times 10^6) = 304,500 - 6,853,000$$
$$= -6,548,500$$
$$= -6.548500 \times 10^6$$

$$(3.045 \times 10^{-4}) - (6.853 \times 10^{-7}) = 0.0003045 - 0.0000006853$$
$$= 0.0003038147$$
$$= 3.038147 \times 10^{-4}$$
$$(3.045 \times 10^{5}) - (6.853 \times 10^{-7}) = 304{,}500 - 0.0000006853$$
$$= 304{,}499.9999993147$$
$$= 3.044999999993147 \times 10^{5}$$

قـــد يبدو العمل بعددين مكتوبين بتدوين قوة العدد 10 في البداية مزعجاً عند إجراء الجمع والطرح ولكـــن يـــوجد اعتبار آخر وهو: مسألة الأرقام الهامة. يجعل العمل بتدوين قوة العدد 10 عمليات الجمع والطرح في عالم الفيزياء التجريبية غير الدقيق سهلاً تماماً وفي بعض الأحيان بسيطاً. إذا اختلفت القيم المطلقة لعددين بعدة مراتب، يمكن عندها أن تنتهي القيمة المطلقة للعدد الأصغر (العدد الأقرب إلى الصفر) إلى عدد صغير جداً حيث يمكن عندها إهماله لاعتبارات تجريبية. سنناقش هذه الظاهرة لاحقاً في هذا الفصل.

الضرب

عند ضرب عددين مكتوبين بتدوين قوة العدد 10، يجري ضرب الأعداد العشرية (الواقعة على يسار رمز الضرب) ببعضها. ثم تُجمع قوى العدد 10. أخيراً، يجري تحويل حاصل الضرب إلى الشكل القياسي. هذه ثلاثة أمثلة تستخدم أزواج الأعداد نفسها:

$$(3.045 \times 10^{5}) \times (6.853 \times 10^{6}) = (3.045 \times 6.853) \times (10^{5} \times 10^{6})$$
$$= 20.867385 \times 10^{(5+6)}$$
$$= 20.867385 \times 10^{11}$$
$$= 2.0867385 \times 10^{12}$$
$$(3.045 \times 10^{-4}) \times (6.853 \times {}^{10-7}) = (3.045 \times 6.853) \times (10^{-4} \times 10^{-7})$$
$$= 20.867385 \times 10^{[-4+(-7)]}$$
$$= 20.867385 \times 10^{-11}$$
$$= 2.0867385 \times 10^{-10}$$
$$(3.045 \times 10^{5}) \times (6.853 \times {}^{10-7}) = (3.045 \times 6.853) \times (10^{5} \times 10^{-7})$$
$$= 20.867385 \times 10^{(5-7)}$$
$$= 20.867385 \times 10^{-2}$$
$$= 2.0867385 \times 10^{-1}$$
$$= 0.20867385$$

يُكتب العدد الأخير بالشكل العشري البحت لأن الأس ضمن المجال من 2- إلى 2.

القسمة

عــنـد تقـسـيم الأعداد المكتوبة بتدوين قوة العدد 10، يجري تقسيم الأعداد (الواقعة على يسار رمز القسمة) على بعضها. ثم يجري طرح قوى العدد 10. أخيراً، يجري تحويل ناتج القسمة إلى الشكل القياسي. دعنا نطبق ذلك على أزواج الأعداد الثلاثة التي استخدمناها سابقاً:

$$
\begin{aligned}
(3.045 \times 10^5)/(6.853 \times 10^6) &= (3.045/6.853) \times (10^5/10^6) \\
&\approx 0.444331 \times 10^{(5-6)} \\
&= 0.444331 \times 10^{-1} \\
&= 0.0444331
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
(3.045 \times 10^{-4})/(6.853 \times 10^{-7}) &= (3.045/6.853) \times (10^{-4}/10^{-7}) \\
&\approx 0.444331 \times 10^{[-4-(-7)]} \\
&= 0.444331 \times 10^3 \\
&= 4.44331 \times 10^2 \\
&= 444.331
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
(3.045 \times 10^5)/(6.853 \times 10^{-7}) &= (3.045/6.853) \times (10^5/10^{-7}) \\
&\approx 0.444331 \times 10^{[5-(-7)]} \\
&= 0.444331 \times 10^{12} \\
&= 4.44331 \times 10^{11}
\end{aligned}
$$

لاحــظ إشــارة (≈) "مساوٍ تقريباً" في المعادلات السابقة. لا يجري حساب حاصل القسمة بشكل صــاف للحصول على نتيجة بعدد معقول من الخانات. قد تسأل الآن "ما هو العدد المعقول من الخانات؟" يكمن الجواب في المنهجية التي يستخدمها العلماء لتحديد الأرقام الكبيرة. سنشرح ذلك قريباً.

الرفع إلى قوة

عند رفع عدد إلى قوة في التدوين العلمي، يجب رفع المُعاملات وقوة العدد 10 نفسها إلى هذه القوة ثم نُجري عملية الضرب. لنأخذ بالاعتبار المثال التالي:

$$
\begin{aligned}
(4.33 \times 10^5)^3 &= (4.33)^3 \times (10^5)^3 \\
&= 81.182737 \times 10^{(5\times3)} \\
&= 81.182737 \times 10^{15} \\
&= 8.1182727 \times 10^{16}
\end{aligned}
$$

إذا كـنـت رياضياً بحتاً، ستلاحظ أن الأقواس في السطرين الأول والثاني هي أقواس زائدة. من وجهة نظر

علمية عملية، أن تكون نتيجة الحساب صحيحة أكثر أهمية من أن تكون العبارة رياضية مضغوطة قدر الإمكان.

لنأخذ مثالاً آخر، يكون الأس فيه سالباً:

$$(5.27 \times 10^{-4})^2 = (5.27)^2 \times (10^{-4})^2$$
$$= 27.7729 \times 10^{(-4\times2)}$$
$$= 27.7729 \times 10^{-8}$$
$$= 2.77729 \times 10^{-7}$$

حساب الجذور

لحـــساب جذر عدد مكتوب بتدوين قوة العدد 10، فإن أسهل ما يمكن أن نقوم به هو اعتبار الجذر أس كسري. الجذر التربيعي لعدد ما هو العدد نفسه مرفوعاً للقوة ½؛ الجذر التكعيبـــي لعدد ما هو العدد نفـــسه مـــرفوعاً للقوة ⅓. ثم يمكنك بعدها ضرب الأعداد التي تمثل القوى بطريقة ضرب الأعداد الكاملة نفسها تماماً. وهذا مثال عن ذلك:

$$(5.27 \times 10^{-4})^{1/2} = (5.27)^{1/2} \times (10^{-4})^{1/2}$$
$$\approx 2.2956 \times 10^{[(4\times1/2)]}$$
$$= 2.2956 \times 10^{-2}$$
$$= 0.02956$$

لاحـــظ إشارة "مساوٍ تقريباً" في السطر الثاني. الجذر التربيعي للعدد 5.27 هو عدد أصم (غير دوري وغـــير منـــته) وأفضل ما نستطيع القيام به هو تقريب جزئه العشري الممتد. لاحظ أيضاً أنه نظراً لأن أس النتيجة يقع ضمن الحدود التي تسمح لنا بكتابة العدد بشكله العشري الصرف، فقد قمنا بذلك للتخلص من قوة العدد 10.

التقريب، الخطأ، الأسبقية

إن الأعـــداد التي تواجهها في الفيزياء ليست ذات قيم دقيقة. في الحقيقة، نادراً ما تكون الأعداد في الفيزياء التجريبية دقيقة، وواضحة، ومألوفة للرياضيين. غالباً ما نقوم بالتقريب. يوجد طريقتان للقيام بذلك التقريب: *بالحذف* (أبسط ولكن أقل دقة) *والتقريب بالتدوير* (أكثر صعوبة قليلاً ولكنه أكثر دقة).

التقريب بالحذف

تحـــذف إجـــرائية التقريب بالحذف جميع الأعداد الواقعة على يمين فاصلة محددة في القسم العشري للعـــدد. تستخدم بعض الآلات الحاسبة الإلكترونية هذه الإجرائية لإظهار العدد على شاشاتها. مثلاً، يمكن اختصار العدد 3.830175692803 وفق الخطوات التالية:

3.830175692803
3.83017569280
3.8301756928
3.830175692
3.83017569
3.8301756
3.830175
3.83017
3.83
3.8
3

التدوير

يُعتـــبر التدوير الطريقة الأفضل لإظهار الأعداد بشكلها المختصر. في هذه الطريقة، وعند حذف خانة معينة (تدعى r) في النهاية اليمنى من العبارة، لا تتغير الخانة q (والتي تصبح الخانة r الجديدة بعد حـــذف الخانـــة r القديمة) الواقعة إلى يسار r مباشرة إذا كان $0 \leq r \leq 4$. أما إذا كان $5 \leq r \leq 9$، عندها تُزاد قيمة q بمقدار واحد ("يُدوَّر"). تستخدم بعض الآلات الحاسبة الإلكترونية التدوير بدلاً من التقريب بالحذف. إذا جرى استخدام التدوير، يمكن اختصار العدد 3.830175692803 وفق الخطوات التالية:

3.830175692803
3.83017569280
3.8301756928
3.830175693
3.83017569
3.8301757
3.830176
3.83018
3.8302
3.830
3.83
3.8
4

الخطأ

تكــون الدقة مستحيلة عند قياس الكميات الفيزيائية. تحدث الأخطاء نتيجة عدم كمال الأجهزة وفي بعــض الأحيان بسبب الأخطاء البشرية أيضاً. افترض أن x_a تمثل القيمة الفعلية للكمية المقاسة. ولتكن x_m القيمة المقاسة لتلك الكمية و بالوحدات نفسها. يُعطى الخطأ المطلق D_a (بوحدات x_a نفسها) بالعلاقة

$$D_a = x_m - x_a$$

و يساوي الخطأ النسبي D_p الخطأ المطلق مقسوماً على القيمة الفعلية للكمية:

$$D_p = (x_m - x_a)/x_a$$

الخطأ النسبي المئوي $D_{\%}$ يساوي مائة ضعف الخطأ النسبي ويجري التعبير عنه كنسبة:

$$D_{\%} = 100\ (x_m - x_a)/x_a$$

تكــون قيمة الخطأ المطلق والنسبي موجبة إذا كان $x_m > x_a$ وسالبة إذا كان $x_m < x_a$. وهذا يعني أنه إذا كانــت القــيمة المقاسة كبيرة جداً، يكون الخطأ موجباً، وإذا كانت القيمة المقاسة صغيرة جداً، يكون الخطأ سالباً.

هــل يبدو أي شيء غريب بشأن الصيغ السابقة؟ هل تستصعبها قليلاً؟ لاحظ أن المقسوم عليه (المقام) في المعــادلات الــثلاث جميعها يحتوي القيمة x_a، أي القيمة الفعلية للكمية قيد التدقيق؛ لا نعرف القيمة التي نقبلها بالــضبط بسبب عدم كمال أجهزتنا! كيف يمكننا حساب الخطأ اعتماداً على صيغ تحتوي على كمية خاضعة لخطــأ كبير فيها؟ الجواب هو بالتخمين الجيد لقيمة x_a. يجري ذلك بأخذ عدة قياسات وربما أخذ عدد كبير من القياسات، كل منها ذو قيم خاصة x_{m1}، x_{m2}، x_{m3}، وهكذا، ثم أخذ المتوسط الحسابي لها للحصول على تقدير جيد لقيمة x_a. ذلك يعني أنه في عالم المُكوِّنات الفيزيائية غير الكامل، فإن مدى شكنا مشكوك فيه!

يمكن أيضاً استخدام منهجية حساب الخطأ السابقة لتحديد مدى ابتعاد قيمة x_m المقروءة عن المتوسط بعيد – الأمد x_a، حيث يجري استنتاج x_a من خلال عدة قراءات تُؤخذ خلال فترة من الزمن.

الأسبقية

اتفــق الرياضيون، والعلماء، والمهندسون جميعهم على ترتيب دقيق للعمليات التي يجب إنجازها عندما تظهر مع بعضها في العبارة. يمنع ذلك التشويش والغموض. عند ظهور عمليات مختلفة في العبارة كالجمع، والطــرح، والــضرب، والقــسمة، والرفع إلى قوة، وأنت بحاجة لتبسيط هذه العبارة، نفّذ العمليات وفق التسلسل التالي:

- بسِّط جميع العبارات ضمن أقواس من الداخل إلى الخارج.
- أنجز جميع العمليات الأسية، مُباشِراً من اليسار إلى اليمين.
- أنجز جميع عمليات الضرب والقسمة، مُباشِراً من اليسار إلى اليمين.
- أنجز جميع عمليات الجمع والطرح، مُباشِراً من اليسار إلى اليمين.

المــثالان التالــيان همــا لعبارتين جرى تبسيطهما وفقاً للقواعد السابقة. لاحظ أن ترتيب الأعداد والعمليات هو نفسه في كل حالة، ولكن تختلف عمليات التجميع.

$$[(2+3)\ (-3 - 1)^2]^2$$

$$[5 \times (-4)^2]^2$$

$$(5 \times 16)^2$$

$$80^2$$

$$6400$$

$$\{[2 + 3 \times (-3) - 1]^2\}^2$$

$$\{[2 + (-9) - 1]^2\}^2$$

$$(-8^2)^2$$

$$64^2$$

$$4096$$

افتــرض أنه لديك عبارة معقدة لا يوجد فيها أقواس ( )، أو أقواس متوسطة { }، أو أقواس مجموعة [ ]. لن يسبب ذلك الغموض إذا جرى اتباع القواعد السابقة. خذ بعين الاعتبار هذا المثال:

$$z = -3x^3 + 4x^2y - 12xy^2 - 5y^3$$

لــو كُتب هذا المثال باستخدام الأقواس، والأقواس المتوسطة، وأقواس المجموعة، بهدف تعزيز قواعد الأسبقية، فإنه سيبدو على الشكل:

$$z = [-3\ (x^3)] + \{4\ [(x^2)\ y]\} - \{\ 12\ [x\ (y^2)]\} - [5\ (y^3)]$$

وبمــا أنــنا اتفقنا على قواعد الأسبقية، نستطيع إجراء العمليات دون الحاجة إلى أقواس، أو أقواس متوســطة، أو أقــواس مجموعة. سيبقي ذلك الرياضيين سعداء. إذا كان هناك أي شك في المعادلة الحاسمة، يُفضَّل عندها استخدام زوج من الأقواس غير الضرورية كي لا ترتكب خطأً مكلفاً.

الأرقام الهامة

عــند إنجــاز الضرب أو القسمة باستخدام تدوين قوة العدد 10، لا يمكن لعدد الأرقام الهامة في النتــيجة أن يكــون أكبر من عدد الأرقام الهامة في العبارة الأقل دقة. قد تتساءل لماذا وجدنا في بعض الأمثلة السابقة أجوبة عدد أرقامها أكبر من أرقام أي من الأعداد الواردة في المسألة الأصلية. لا يشكل ذلــك مــشكلة في الرياضيات البحتة، وحتى هذه اللحظة فنحن لا نهتم بها. ولكن الأمور في الفيزياء ليست كذلك.

خــذ بالاعتــبار العددين $x = 2.453 \times 10^4$ و $y = 7.2 \times 10^7$. تُعتبر الحالة التالية صحيحة تماماً في الحساب:

$$xy = 2.453 \times 10^4 \times 7.2 \times 10^7$$
$$= 2.453 \times 7.2 \times 10^{11}$$
$$= 17.6616 \times 10^{11}$$
$$= 1.76616 \times 10^{12}$$

ولكـــن، إذا مثّل كل من x و y كميات مقاسة، كما هي الحالة في الفيزياء التجريبية، تحتاج العبارة السابقة عندها إلى تقييم. يجب أن ننتبه جداً إلى الدقة التي ننشدها.

كم نحن دقيقون؟

عندما ترى عملية ضرب أو قسمة تحتوي على مجموعة من الأعداد في تدوين علمي، قم بحساب عدد الخانـــات في الأجـــزاء العشرية لكل عدد، ثم خذ عدد الخانات الأقل. يشكل ذلك عدد الأرقام الهامة التي تنـــشدها في الحـــل أو الجـــواب النهائي. يوجد في المثال السابق أربع خانات في القسم العشري للعدد x، وخانـــتان في القـــسم العشري للعدد y. لذا يجب تدوير الجواب والذي يحتوي على ستة أرقام هامة، إلى رقمين. من المهم استخدام التدوير وليس التقريب بالحذف! ستستنتج أن

$$xy = 2.453 \times 10^4 \times 7.2 \times 10^7$$
$$= 1.8 \times 10^{12}$$

عند الإصرار في حالات من هذا النمط على أن تكون صارماً مائة بالمائة، يجب أن تستخدم إشارة المساواة المعقوفة لأنك ستتعامل دائماً مع قيم تقريبية. ولكن، يرتاح معظم المجربين لاستخدام إشارات المساواة العادية. من المفهوم عموماً أن القياسات الفيزيائية غير دقيقة ويمكن أن تكون كتابة الإشارات المعقوفة متعبة.

افترض أننا نريد إيجاد ناتج قسمة x/y بدلاً من إيجاد الضرب xy؟

باشر كالتالي:

$$x/y = (2.453 \times 10^4)/(7.2 \times 10^7)$$
$$= (2.453/7.2) \times 10^{-3}$$
$$= 0.3406944444 \ldots \times 10^{-3}$$
$$= 3.406944444 \ldots \times 10^{-4}$$
$$= 3.4 \times 10^{-4}$$

ماذا عن الأصفار

قـــد تحـــصل في بعض الأحيان عند إجرائك للحسابات على جواب بقيمة تبدو نهائية. خذ بالاعتبار العددين $y = 1.41422$، $x = 1.41421$. يملك كل من هذين العددين ستة أرقام هامة وعند إجراء الضرب وأخذ الأرقام الهامة بالحسبان نحصل على:

$$xy = 1.41421 \times 1.41422$$
$$= 2.0000040662$$
$$= 2.00000$$

يـــبدو هـــذا العدد وكأنه يساوي تماماً 2. في الرياضيات البحتة 2.00000 = 2 ولكن ليس في الفيزياء! (وهذا ما دعا الرياضي المشهور G.H. Hardy لأن يكتب بأن الرياضيين على تماس أفضل بالحقيقة من الفيزيائيين). يـــوجد دائماً بعض الأخطاء في الفيزياء. إن هذه الأصفار الخمسة هامة لأنها تشير إلى مدى اقتراب النتيجة التي ننشدها من العدد 2. نعرف أن الجواب قريب جداً من فكرة الرياضيين حول العدد 2، ولكن يوجد ارتياب يصل إلى 0.000005 ±. لـــو ألغيـــنا الأصفار وقلنا ببساطة أن $xy=2$، فإننا نسمح بارتياب يصل إلى 0.5 ±، لكننا مؤهلون في هذه الحالة بالقيام بأفضل من ذلك. عندما نطالب بعدد محدد من الأرقام الهامة، تحصل الأصفار على أهمية موازية للأرقام الأخرى.

الأرقام الهامة في الجمع والطرح

قـــد يـــستلزم تحديد عدد الأرقام الهامة عند جمع أو طرح الكميات المقاسة حكماً شخصياً. تشكل كـــتابة جميع القيم بشكلها العشري الصرف الإجرائية الأفضل (إذا كان ذلك ممكناً)، قم بإجراء الحسابات وكأنك رياضي بحت، ثم قرر في نهاية الإجرائية وبشكل معقول عدد الأرقام الهامة التي تنشدها.

تكون نتيجة تحديد الأرقام الهامة في الجمع أو الطرح مشابهة في بعض الحالات لما يحدث مع الضرب أو القـــسمة. خذ على سبيل المثال المجموع $x + y$، حيث إن $x = 3.778800 \times 10^{-6}$ و$y = 9.22 \times 10^{-7}$. يجري تنفيذ هذا الحساب كما يلي:

$$x = 0.000003778800$$
$$y = 0.000000922$$
$$x + y = 0.0000047008$$
$$= 4.7008 \times 10^{-6}$$
$$= 4.70 \times 10^{-6}$$

ولكن في بعض الأمثلة الأخرى، تكون إحدى القيم في المجموع أو الفرق غير هامة بالنسبة للأخرى. لنقل أن $x = 3.778800 \times 10^{4}$، بينما $y = 9.22 \times 10^{-7}$. تُنفذ إجرائية إيجاد المجموع كما يلي:

$$x = 37{,}788.00$$
$$y = 0.000000922$$
$$x + y = 37{,}788.000000922$$
$$= 3{,}7788000000922 \times 10^{4}$$

يكـــون المـــتحول y في بعـــض الأحيان أصغر بكثير من المتحول x ولا يؤثر بشكل كبير على قيمة

المجمـــوع. من الأفضل هنا أن ننظر إلى y على أنه تابع للمتحول x، أو على أنه تابع للمجموع $x + y$، وذلك يكافـــئ البعوضة الصغيرة عند مقارنتها بالبطيخة. فإذا وقفت البعوضة الصغيرة على البطيخة فلن يؤثر ذلك علـــى الـــوزن الكلـــي، ولن يؤثر أيضاً حضور أو غياب البعوضة على دقة القياس. نستطيع أن نستنتج أن "المجموع" هنا هو العدد الكبير نفسه. أي أن قيمة y هنا قريبة من الخطأ المهمل:

$$x + y = 3.778800 \times 10^4$$

على السيد G. H. Hardy أن يشكر السماء لأنه ليس عالما تجريبيا. ولكن، على البعوضة الصغيرة أن تغـــادر البطـــيخة دون التفكير بالمسألة. على النظريين استنتاج المعادلات للتعبير عن شكل السطح المشكل بواســـطة المحيط الهندسي ثنائي الأبعاد للبطيخة في الفضاء المحيط ذي الأبعاد الثلاثة بدون البعوضة الصغيرة، ومرة أخرى معها دون التعجب للفارق بين العلاقتين السابقتين. على المجرب وبعد وزن البطيخة، أن ينحى بالبعوضة الصغيرة جانباً، ويحسب عدد الأشخاص الذين سيتشاركون البطيخة، ويقوم بتقطيعها، وأن يتناول الغداء مع الأصدقاء، وأن يتأكد من التخلص من بذورها.

امتحان موجز

عـــد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت على ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. في حال وجود عددين مختلفين بست مراتب فإن قيمة العامل

   (a) 6.

   (b) 36.

   (c) 10^6.

   (d) 6^6.

2. افتـــرض أنـــنا ابتكرنا وحدة جديدة سميناها *فلاموكس* (*flummox*) (ورمزنا لها: *Fx*). فماذا سندعو منطقيا *flummox* 10^{-9}؟

   (a) ميللي فلاموكس (1 *mFx*).

   (b) نانو فلاموكس (1 *nFx*).

   (c) بيكو فلاموكس (1 *pFx*).

   (d) كيلو فلاموكس (1 *kFx*).

3. ما هي قيمة $6 - 4^2 \times 2$؟

   (a) 26.

   (b) 58.

   (c) 20.

(d) لا يوجد أي طريقة لمعرفة القيمة؛ إنها عبارة غامضة.

4. ما هي الطريقة الأخرى لكتابة *78,303*؟

(a) 7.8303×10^{-4}.

(b) 7.8303E + 04.

(c) 0.78×10^{5}.

(d) شكل هذا العدد هو الشكل المناسب أكثر من أي شكل سابق.

5. افتـــرض أنـــنا قسنا سرعة وصلة الإنترنت 100 مرة، وحصلنا على 480 كيلو بت بالثانية (kbps). افتـــرض أن سرعة الوصلة ثابتة بكل تأكيد. ذهبنا إلى موقع اختبار وحصلنا على قراءة **440 kbps**. ما هو الخطأ النسبي في هذا القياس؟ عبر عن جوابك بثلاثة أرقام هامة.

(a) 440/480، أو 91.7 بالمائة.

(b) (480 - 440)/440، أو 9.09 بالمائة.

(c) (440 - 480)/480، أو 8.33- بالمائة.

(d) (440 - 480)، أو 40.0- بالمائة.

6. افتـــرض أننا قسنا كمية ما وحصلنا على 8.53×10^{4} وحدة، بدقة تبلغ ثلاثة أرقام هامة. ضمن أي مجال من الوحدات الكاملة نستطيع أن نقول أن القيمة الفعلية هي؟

(*a*) من 85,250 وحدة إلى 85,349 وحدة.

(*b*) من 85,290 وحدة إلى 86,310 وحدة.

(*c*) من 85,399 وحدة إلى 86,310 وحدة.

(*d*) لا نستطيع أن نقول شيئاً.

7. ما هي نتيجة طرح 2.02×10^{-12} من 8.899×10^{5} آخذين بالاعتبار الأرقام الهامة؟

(a) 2.02×10^{-12}.

(b) 8.9×10^{5}.

(c) 6.88×10^{5}.

(d) 8.899×10^{5}.

8. ما هو ترتيب إنجاز العمليات في عبارة تحتوي على أقواس؟

(a) الجمع، الطرح، الضرب، القسمة، الرفع إلى قوة.

(b) الرفع إلى قوة، الضرب والقسمة، الجمع والطرح.

(c) من اليسار إلى اليمين.

(d) من المستحيل أن نعرف.

9. افترض أن عدد سكان دولة ما 78,790,003 مواطن. كيف يمكن تمثيل ذلك بثلاثة أرقام هامة؟

(a) 7.88×10^7.

(b) 7.879×10^7.

(c) 78,800,000.

(d) 78E + 06.

10. ما هو حاصل ضرب العدد 72×10^5 والعدد 6.554×10^{-5} مع أخذ ثلاثة أرقام هامة بالاعتبار؟

(a) 57.15088.

(b) 57.151.

(c) 57.15.

(d) 57.2.

الفصل 3

رسم المخططات

الرســـوم البيانـــية هي مخططات لتوابع أو علاقات تُعبِّر عن الظواهر في عالم الفيزياء. الرسوم البيانية موجودة بأنواعها؛ إن أبسط الرسوم هي الرسوم ثنائية الأبعاد. لا يمكن تصور الرسوم البيانية الأكثر تعقيداً حتى من قبل أشد البشر ذكاء، ونحتاج إلى الكمبيوترات لإظهار أجزاء التقاطع بينها وبالتالي يمكن الحصول على فكرة عما يحدث. سنرى في هذا الفصل أكثر طرق الرسم المستخدمة شيوعاً. ستجد وفرة من الأمثلة بحيث يمكنك أن ترى كيف تبدو الرسوم البيانية للعلاقات والتوابع على اختلافها.

الإحداثيات المتعامدة

إن نظـــام الإحداثيات ثنائي الأبعاد الأكثر سهولة هو المستوى الديكارتي (الشكل (3−1))، ويدعى أيـــضاً *بالإحداثيات المتعامدة* أو المستوى xy. يُرسم المتحول المستقل على المحور x أو محور *الفواصل*؛ يُرسم *المستحول غير المستقل* على المحور y أو *محور التراتيب*. تكون تدريجات محور الفواصل ومحور التراتيب خطية (ولكن ليس دائماً)، وهما عاموديان على بعضهما البعض. من غير الضروري تمثيل تقسيمات محور الفواصل بالتزايد نفسه الذي يجري به تمثيل تقسيمات محور التراتيب.

نموذج المعادلة الخطية ميل - نقطة اعتراض

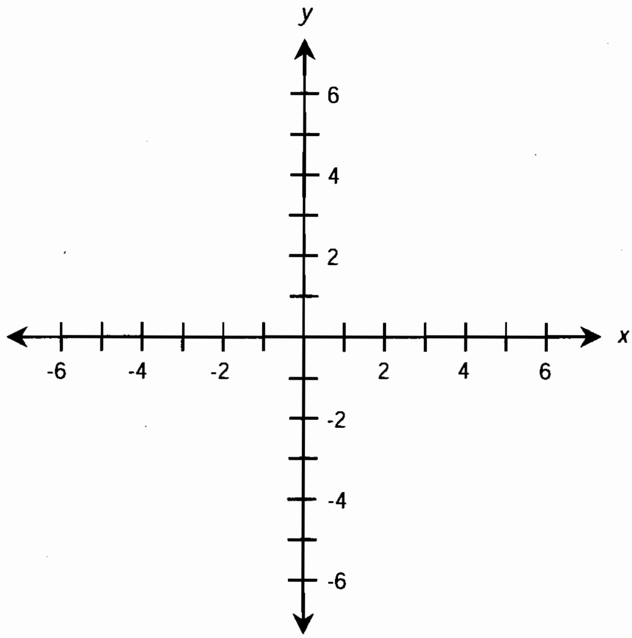
يمكـــن إعـــادة ترتيب المعادلة الخطية بمتحولين من الشكل القياسي إلى شكل ملائم قابل للرسم كما يلي:

$$ax + by + c = 0$$

$$ax + by = -c$$

$$by = -ax - c$$

$$y = (-a/b)x - (c/b)$$



الشكل (3-1): مستوى الإحداثيات الديكارتي.

حـيث إن a، وb، وc ثـوابت حقيقـية، و$b \neq 0$. تظهر معادلة كهذه كخط مستقيم في المستوى الديكارتي. لنجعل dx يمثّل تغيّراً صغيراً في قيمة x؛ ولنجعل dy يُمثّل التغيّر في قيمة y الناجم عن التغيّر في قـيمة x. تُدعـى النسبة dy/dx *ميل* المستقيم ويرمز له بالرمز m. لنجعل k يُمثّل قيمة y في نقطة تقاطع المستقيم مع محور التراتيب. وبالتالي تكون لدينا المعادلات:

$$m = -a/b$$

$$k = -c/b$$

يمكن إعادة كتابة المعادلة بالنموذج *ميل- نقطة اعتراض* على الشكل

$$y = mx + k$$

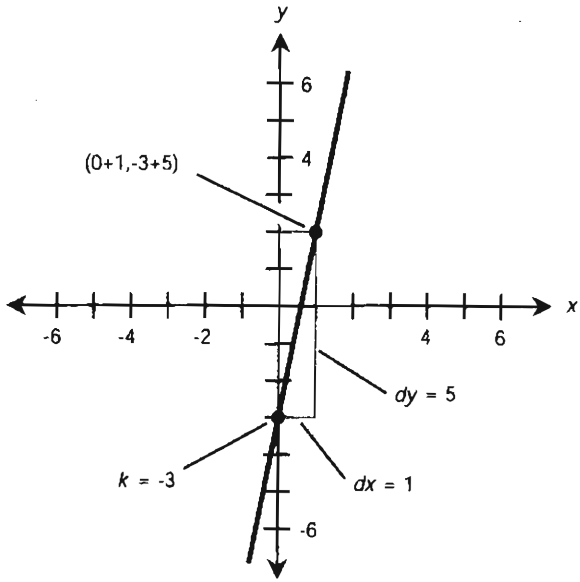
لرسم المعادلة الخطية في الإحداثيات الديكارتية، باشر كما يلي:

- حوّل المعادلة إلى النموذج ميل - نقطة اعتراض.
- ارسم النقطة $y = k$.
- انتقل إلى اليمين n وحدة على المستقيم.
- انتقل للأعلى mn وحدة (أو للأسفل $-mn$ وحدة).
- ارسم النقطة الناتجة $y = mn + k$.
- قم بوصل النقطتين بخط مستقيم.

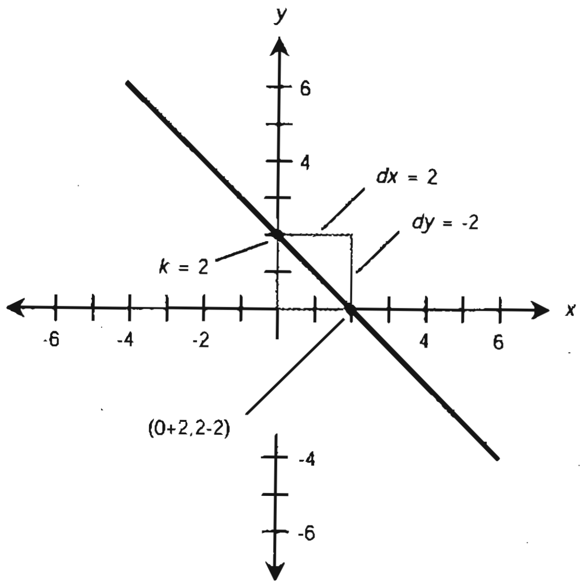
توضح الأشكال (3–2) و(3–3) المعادلات الخطية التالية مرسومة وفق النموذج ميل - نقطة اعتراض:

$$y = 5x - 3$$

$$y = -x + 2$$



الشكل (3–2): رسم ميل– نقطة اعتراض للمعادلة $y = 5x - 3$.



الشكل (3–3): رسم ميل– نقطة اعتراض للمعادلة $y = -x + 2$.

يشير الميل الموجب إلى أن المستقيم "يصعد للأعلى"، ويشير الميل السالب إلى أن المستقيم "ينحدر للأسفل" عند الانتقال لليمين، ويشير الميل صفر إلى أن المستقيم أفقي. إن ميل المستقيم العامودي غير محدد لأنه، وكما هو موضح هنا، يتطلب القسمة على صفر.

نموذج المعادلة الخطية نقطة - ميل

ليس من المناسب دائماً رسم منحنى المستقيم بالاعتماد على نقطة اعتراض المحور y لأنه قد يكون جزء المنحنى الذي نبحث عنه بعيداً جداً عن هذه النقطة. يمكن في هذه الحالة استخدام نموذج المعادلة الخطية *نقطة-ميل*. يعتمد هذا النموذج على ميل المستقيم m وإحداثيات نقطة معلومة (x_0, y_0):

$$y - y_0 = m\ (x - x_0)$$

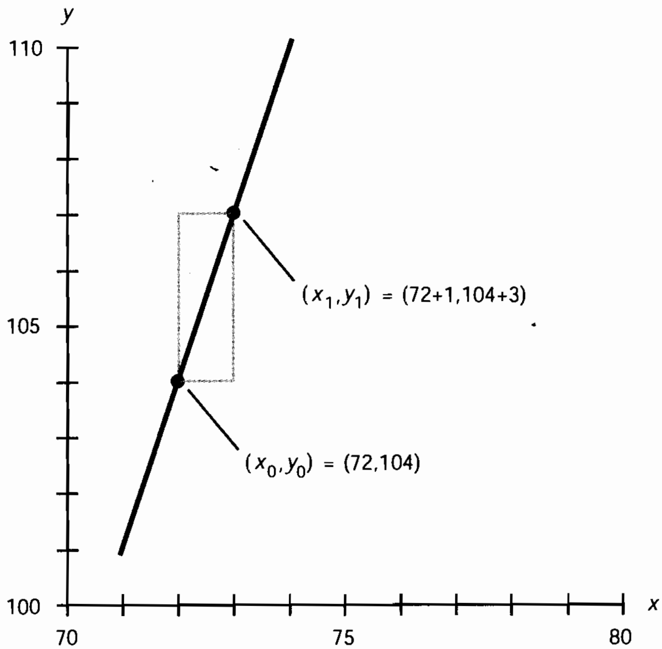
يمكن اتباع الخطوات التالية بالترتيب بهدف رسم منحنى المعادلة الخطية باستخدام نموذج نقطة-ميل:

- حوِّل المعادلة إلى النموذج نقطة-ميل.
- حدِّد النقطة (x_0, y_0) "بتعويض" القيم.
- ارسم (x_0, y_0) في المستوى.
- انتقل لليمين n وحدة على الرسم.
- انتقل للأعلى mn وحدة (أو للأسفل $-mn$ وحدة).
- ضع على المنحنى نتيجة النقطة (x_1, y_1).
- صل بين النقاط (x_0, y_0) و(x_1, y_1) بخط مستقيم.

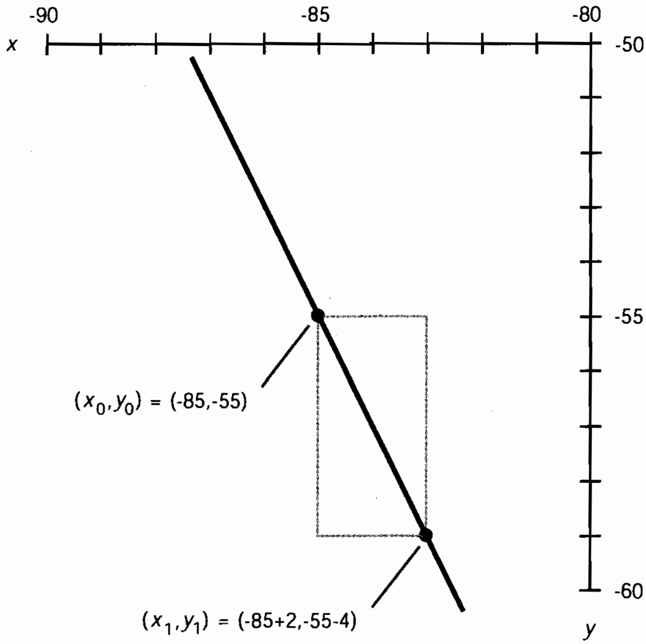
توضح الأشكال (3-4) و(3-5) المعادلات الخطية التالية مرسومة وفق النموذج نقطة-ميل لمناطق نقاطها بعيدة عن المبدأ:

$$y - 104 = 3\ (x - 72)$$

$$y + 55 = -2\ (x + 85)$$



الشكل (3–4): رسم نقطة– ميل للمعادلة $y - 104 = 3\ (x - 72)$.



الشكل (3–5): رسم نقطة– ميل للمعادلة $y + 55 = -2\ (x + 85)$.

إيجاد المعادلة الخطية بالاعتماد على المنحنى

افتـــرض أنـــنا نعمل الآن في الإحداثيات المتعامدة، وأننا نعلم بدقة قيم النقطتين P وQ. تحدد هاتان النقطـــتان خطاً مستقيماً؛ إنها إحدى القواعد الرئيسية في الهندسة. لندعُ المستقيم بالمستقيم L. ودعنا نعطي إحداثيات النقاط هذه الأسماء:

$$P = (x_p, y_p)$$

$$Q = (x_q, y_q)$$

يُعطى ميل المستقيم L بإحدى الصيغتين التاليتين:

$$m = (y_q - y_p)/(x_q - x_p)$$

$$m = (y_p - y_q)/(x_p - x_q)$$

يمكـــن تحديـــد معادلة ميل-نقطة للمستقيم L بالاعتماد على الإحداثيات المعروفة للنقطة P أو Q. لذلك فإن أيّاً من الصيغتين التاليتين تمثل المستقيم L:

$$y - y_p = m(x - x_p)$$

$$y - y_p = m(x - x_q)$$

معادلة القطع المكافئ

يمـــثل القطع المكافئ منحنى المعادلة التربيعية في الإحداثيات الديكارتية حيث نعوض 0 في قيمة y في الشكل القياسي (تذكر ذلك من الفصل الأول).

$$y = ax^2 + bx + c$$

حـــيث إن $a \neq 0$. (إذا كـــان $a = 0$، فـــإن المعادلة خطية وليست تربيعية). لرسم منحنى المعادلة السابقة، حدّد أولاً إحداثيات النقطة (x_0, y_0) حيث

$$x_0 = -b/(2a)$$

$$y_0 = c - b^2/(4a)$$

تُمثّل هذه النقطةَ نقطة القاعدة للقطع المكافئ؛ وهي النقطة التي يكون بها المنحنى أشد انعطافاً، وهي النقطة الـــتي يكـــون فيها ميل المماس للمنحنى صفراً. حالما تعرف هذه النقطة، قم بإيجاد أربع نقاط إضافية من خلال "تعويض" قيم لا على التعيين في المتحول x؛ بحيث تكون أكبر أو أصغر من x_0، وقم بحساب قيم y الموافقة. قم بتسمية النقاط x هذه: x_{-2}، وx_{-1}، وx_1، وx_2، ويجب أن تكون متساوية في البعد عن طرفي x_0 وبحيث يكون

$$x_{-2} < x_{-1} < x_0 < x_1 < x_2$$

$$x_{-1} - x_{-2} = x_0 - x_{-1} = x_1 - x_0 = x_2 - x_1$$

ســـيقدم لك ذلك خمس نقاط تقع على القطع المكافئ وهي متناظرة بالنسبة إلى محور القطع. وبالتالي يمكـــن اســـتنتاج المنحنى (وهذا يعني إمكانية قيامك بتخمين بارع وجيد)، وذلك بالاختيار الجيد للنقاط.

يـــستلزم ذلك التجربة والخطأ. إذا كان $a > 0$ سيكون القطع المكافئ مفتوحاً باتجاه الأعلى، وإذا كان $a < 0$ سيكون القطع المكافئ مفتوحاً باتجاه الأسفل.

مثال A

لنأخذ بالاعتبار الصيغة التالية:

$$y = x^2 + 2x + 1$$

نقطة القاعدة هي

$$x_0 = -2/2 = -1$$

$$y_0 = 1 - 4/4 = 1 - 1 = 0$$

بالنتيجة، $(x_0, y_0) = (-1, 0)$

تُرسم هذه النقطة أولاً، ثم تُرسم النقاط التالية:

$$x_{-2} = x_0 - 2 = -3$$

$$y_{-2} = (-3)^2 + 2(-3) + 1 = 9 - 6 + 1 = 4$$

بالنتيجة، $(x_{-2}, y_{-2}) = (-3, 4)$

$$x_{-1} = x_o - 1 = -2$$

$$y_{-1} = (-2)^2 + 2(-2) + 1 = 4 - 4 + 1 = 1$$

بالنتيجة، $(x_{-1}, y_{-1}) = (-2, 1)$

$$x_1 = x_0 + 1 = 0$$

$$y_1 = (0)^2 + 2(0) + 1 = 0 + 0 + 1 = 1$$

بالنتيجة، $(x_1, y_1) = (0, 1)$

$$x_2 = xo + 2 = 1$$

$$y_2 = (1)^2 + 2(1) + 1 = 1 + 2 + 1 = 4$$

بالنتيجة $(x_2, y_2) = (1, 4)$

تُرسم النقاط الخمسة المعلومة كما هو موضح في الشكل (3-6). ومنها يمكن استنتاج المنحنى

مثال B

لنأخذ بالاعتبار الصيغة التالية:

$$y = -2x^2 + 4x - 5$$

نقاط القاعدة هي

$$x_0 = -4/-4 = 1$$

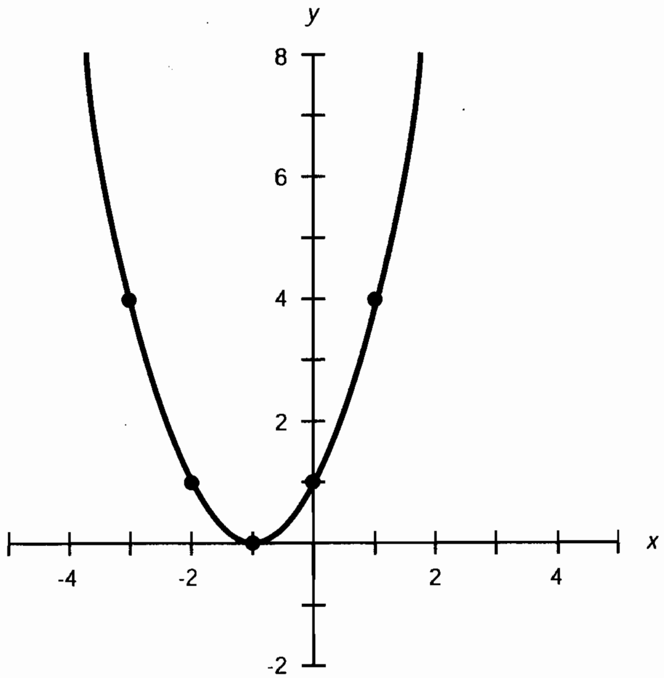
$$y_0 = -5 - 16/-8 = -5 + 2 = -3$$

بالنتيجة، $(x_0, y_0) = (1, -3)$

تُرسم هذه النقطة أولاً، ثم ترسم النقاط التالية:

$$x_{-2} = x_0 - 2 = -1$$

$$y_{-2} = -2\,(-1)^2 + 4\,(-1) - 5 = -2 - 4 - 5 = -11$$



الشكل (3–6): رسم القطع المكافئ $y = x^2 + 2x + 1$.

بالنتيجة، $(x_{-2}, y_{-2}) = (-1, -11)$

$$x_{-1} = x_0 - 1 = 0$$

$$y_{-1} = -2\,(0)^2 + 4\,(0) - 5 = -5$$

بالنتيجة، $(x_{-1}, y_{-1}) = (0, -5)$

$$x_1 = x_0 + 1 = 2$$

$$y_1 = -2\,(2)^2 + 4\,(2) + 5 = -8 + 8 - 5 = -5$$

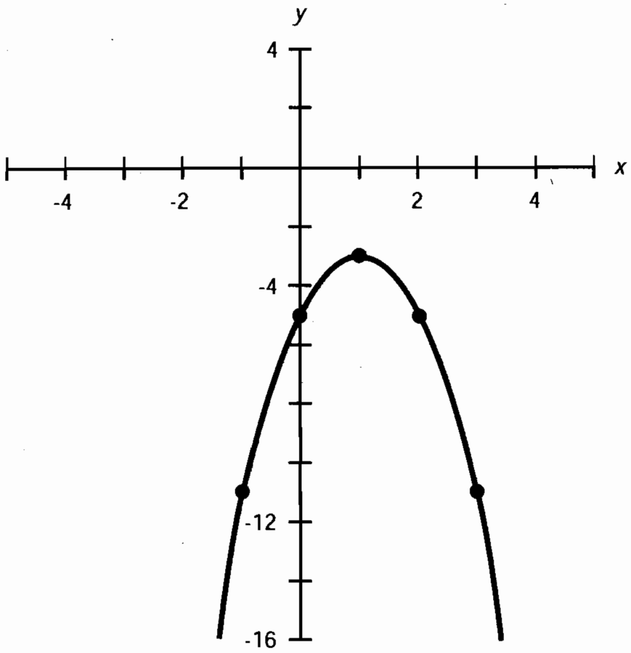
بالنتيجة، $(x_1, y_1) = (2, -5)$

$$x_2 = x_0 + 2 = 3$$

$$y_2 = -2\,(3)^2 + 4\,(3) + 5 = -18 + 12 - 5 = -11$$

بالنتيجة، $(x_2, y_2) = (3, -11)$

جرى رسم النقاط الخمس المعلومة كما هو موضح في الشكل (3-7). ويمكن استنتاج المنحنى من هذه النقاط.



الشكل (3-7): رسم القطع المكافئ $y = -2x^2 + 4x - 5$.

معادلة الدائرة

يُعطى الشكل العام لمعادلة *الدائرة* في المستوى xy بالصيغة التالية:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$$

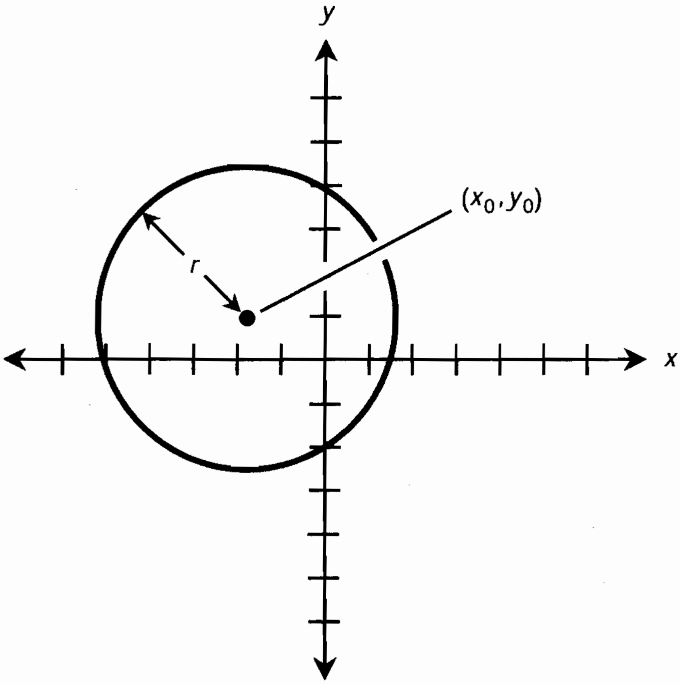
حيث تمثل (x_0, y_0) إحداثيات مركز الدائرة، ويُمثّل r نصف القطر. يوضح الشكل (3-8) ذلك. في الحالة الخاصة التي يكون فيها مركز الدائرة هو مبدأ الإحداثيات تصبح الصيغة على الشكل التالي:

$$x^2 + y^2 = r^2$$

تتقاطع هذه الدائرة مع المحور x في النقاط $(r, 0)$ و$(-r, 0)$؛ وتتقاطع هذه الدائرة مع المحور y في النقاط $(0, r)$ و$(0, -r)$ توجد حالة أكثر خصوصية وهي دائرة الوحدة:

$$x^2 + y^2 = 1$$

يتقاطع هذا المنحنى مع المحور x في النقاط $(1, 0)$ و$(-1, 0)$؛ ويتقاطع أيضاً مع المحور y في النقاط $(0, 1)$ و$(0, -1)$.



الشكل (3−8): ضع الدائرة على المنحنى $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$.

حل مجموعة معادلتين رسومياً

يمكن إيجاد حلول مجموعة معادلتين من خلال رسم كل من المعادلتين في مجموعة الإحداثيات نفسها. تظهر الحلول كنقاط تقاطع بين الرسمين.

مثال A

افترض أنك أُعطيت هاتين المعادلتين، وطُلب منك حلهما وإيجاد قيم x وy التي تحقق كل من المعادلتين في الوقت نفسه:

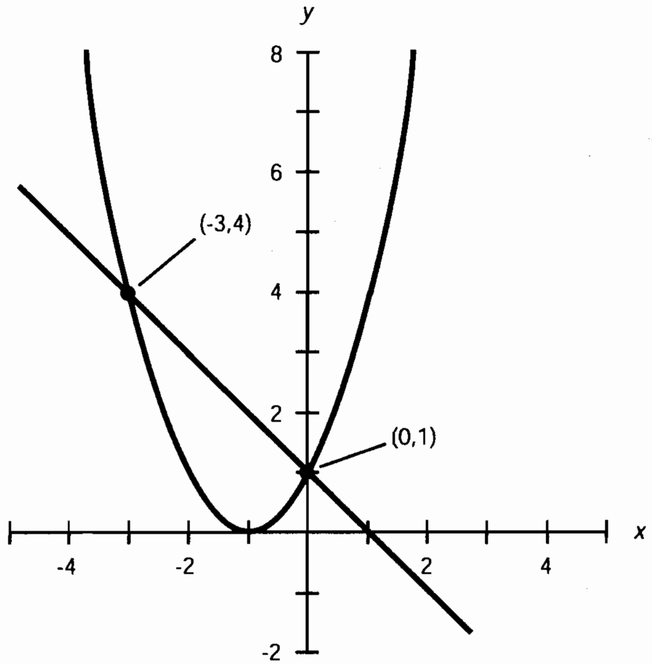
$$y = x^2 + 2x + 1$$

$$y = -x + 1$$

هذه المعادلات مرسومة في الشكل (3−9). يتقاطع المستقيم مع القطع المكافئ بنقطتين، مشيراً لوجود حلين في الوقت نفسه لهذه المجموعة من المعادلات. إن إحداثيات نقاط الحل الموافقة هي

$$(x_1, y_1) = (-3, 4)$$

$$(x_2, y_2) = (0, 1)$$



الشكل (3-9): الطريقة الرسومية لحل المعادلات $y = x^2 + 2x + 1$ و $y = -x + 1$.

مثال B

هذا زوج آخر من المعادلات "اثنين باثنين" (معادلتان بمتحولين) يمكن حله رسومياً:

$$y = -2x^2 + 4x - 5$$

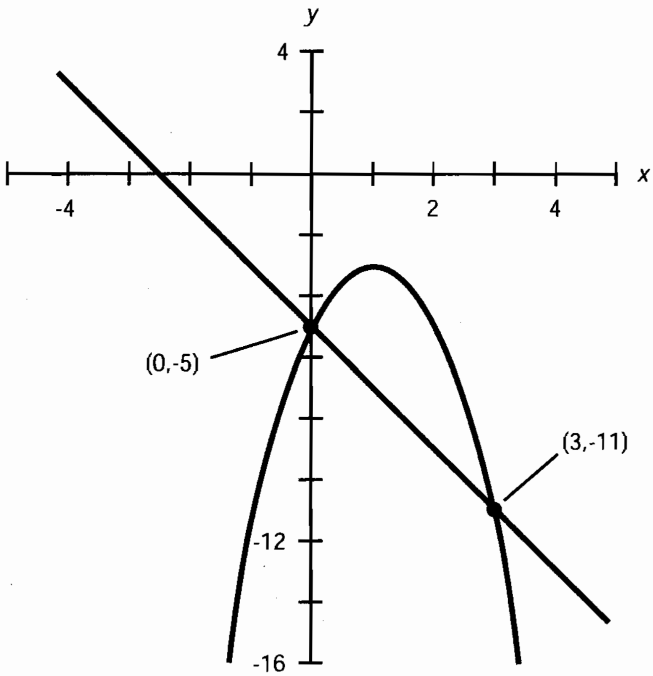
$$y = -2x - 5$$

هـــذه المعادلات مرسومة في الشكل (3-10). يتقاطع المستقيم مع القطع المكافئ بنقطتين، مشيراً لوجود حلين. إن إحداثيات نقاط الحل الموافقة هي

$$(x_1, y_1) = (3,-11)$$

$$(x_2, y_2) = (0, -5)$$

يكـــشف الرسم في بعض الأحيان أن لمجموعة المعادلتين أكثر من حل أو حلاً واحداً أو لا يوجد لهما حـــل مشترك على الإطلاق. تظهر حلول مجموعة المعادلتين دائماً كنقاط تقاطع للرسوم. إذا وُجد n نقطة تقاطـــع بين المنحنيات الممثلة للمعادلتين فذلك يعني وجود n حل في الوقت نفسه لمجموعة المعادلتين. ولكن يُعتـــبر الرســـم أمراً جيداً لتقدير قيم الحلول. يجب استخدام الجبر إذا كان ذلك ممكناً وذلك لإيجاد الحلول الدقيقة لمسائل من هذا النوع. سيكون من الصعب استخدام الجبر لحل المعادلات إذا كانت المعادلات معقدة أو إذا كانـــت الرســـوم عبارة عن نتائج لتجارب معينة. تساعد برامج الكمبيوتر الرسومية في تحديد نقاط تقاطع الرسوم بشكل دقيق، وتُعتبر وسائل جيدة لحل مجموعة معادلتين.

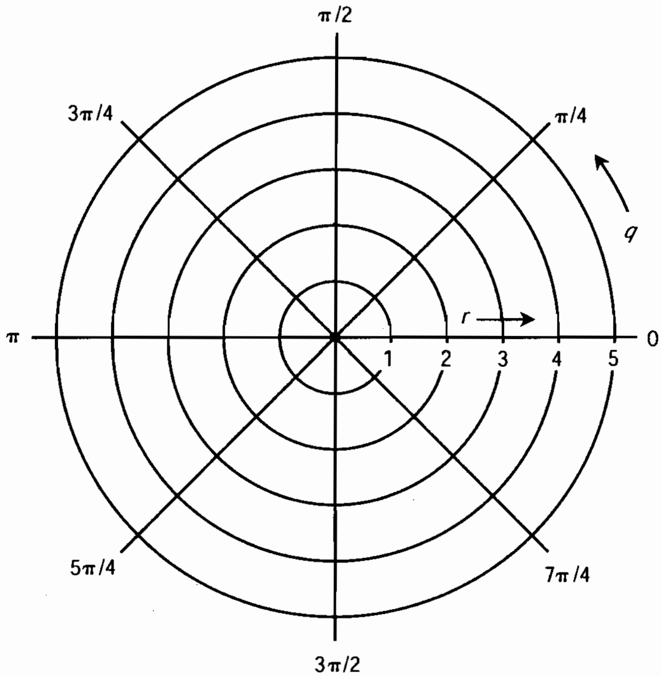


الشكل (3−10): الطريقة الرسومية لحل المعادلات $y = -2x^2 + 4x - 5$ و $y = -2x - 5$.

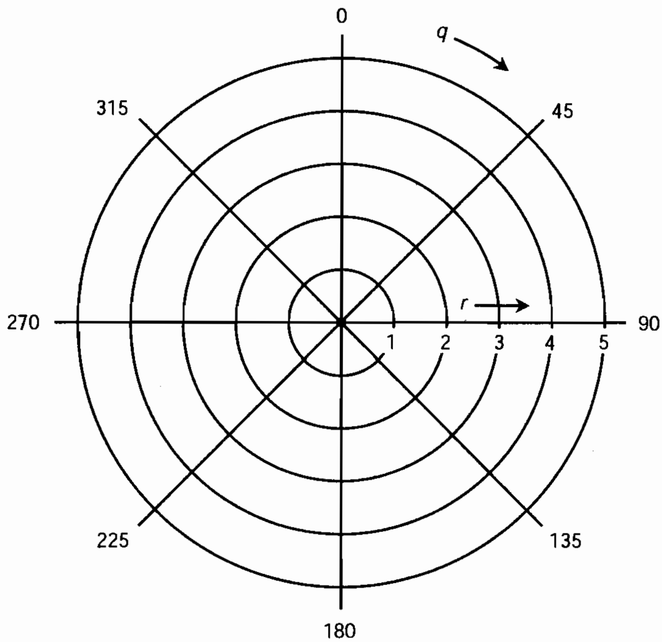
المستوى القطبي

يُعتبر مستوى *الإحداثيات القطبية* طريقة بديلة للتعبير عن مواضع النقاط والعلاقات والمعادلات الرسومية في الأبعاد الثنائية. يُرسم المتحول المستقل كمسافة أو نصف قطر r من المبدأ، ويُرسم المتحول غير المستقل كزاوية q بالنسبة إلى محور مرجعي. يوضح الشكل (3−11) المستوى القطبي المستخدم غالباً من قبل الفيزيائيين. يجري التعبير عن الزاوية q بوحدة تسمى *الراديان*. واحد راديان هو الزاوية المحددة بقوس دائرة طوله مساوٍ لنصف قطر الدائرة التي تحوي ذلك القوس. إذا كان تذكر ذلك معقداً، فكر به على الشكل: الراديان أكبر بقليل من $57°$. أو يمكنك أن تتذكره على الشكل: يوجد في الدائرة الكاملة 2π أو 6.28 راديان. تُرسم الزاوية q بدءاً من الشعاع الممتد إلى اليمين وبعكس عقارب الساعة.

يُظهر الشكل (3−12) النظام القطبي المستخدم من قبل بعض المهندسين، خاصة مهندسي الاتصالات. يستخدم البحارة وعلماء الفلك هذا المخطط أيضاً. جرى التعبير عن الزاوية q هنا بالدرجات ورُسمت هذه الزاوية باتجاه عقارب الساعة بدءاً من الشعاع الممتد للأعلى (الموافق للشمال الجغرافي). ربما رأيت نظام الإحداثيات هذا في صور الرادار المتعلقة بالعواصف. إذا كنت عسكرياً، وخاصة في البحرية أو القوى الجوية ستعرفها على أنها شاشة عرض الرادار القطبية. يُظهر هذا النمط من أجهزة العرض القطبية الزاوية في بعض الأحيان مقاسةً باتجاه عقارب الساعة من الجنوب بدلاً من الشمال الجغرافي.



الشكل (3–11): مستوى الإحداثيات القطبية المستخدم في الفيزياء.



الشكل (3–12): المستوى القطبي المستخدم في الاتصالات، والملاحة، والفلك.

معادلة دائرة مركزها مبدأ الإحداثيات

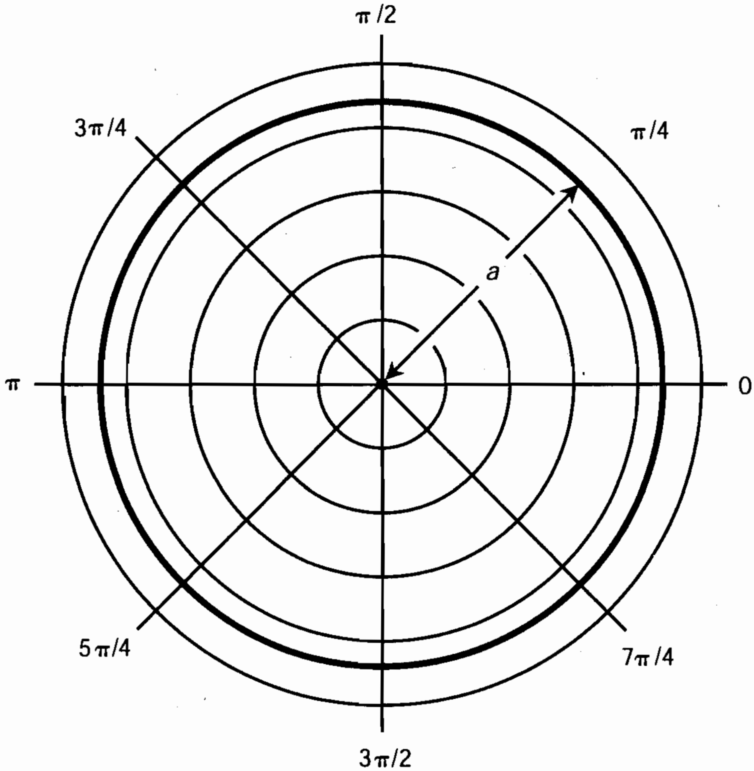
تُعتـــبر معادلة دائرة مركزها مبدأ الإحداثيات في المستوى القطبي أسهل معادلة يمكن الحصول عليها. وتُعطى بالصيغة التالية:

$$r = a$$

حـــيث إن r عدد حقيقي و$0 < a$. يوضح الشكل (3–13) ذلك. تمتلك الرسوم الأخرى كنماذج ورقة البرسيم، والأشكال الحلزونية (اللولبية)، والقلوب (نماذج على شكل قلب) أيضاً معادلات بسيطة في الإحداثيات القطبية ولكن تكون معادلاتها معقدة في الإحداثيات المتعامدة.

نظم أخرى

يوجد بعض نظم الإحداثيات الأخرى التي قد تصادفها في رحلاتك في عالم الفيزياء، تذكر أنه جرى تبسيط التفاصيل التقنية في هذا التقديم. ستتعرف عندما تزداد خبرتك في استخدام هذه النظم على تفاصيل أكثر، ولكنها ستربكك إذا تعاملنا معها الآن.



الشكل (3–13): الرسم القطبي لدائرة مركزها مبدأ الإحداثيات.

زوايا العرض الجغرافي وزوايا الطول الجغرافي

تحدد *زوايا العرض الجغرافي وزوايا الطول الجغرافي* بشكل وحيد مواضع النقاط على سطح الكرة الأرضية أو في السماء. يوضح الشكل (3- 14- أ) مخطط المواقع الجغرافية على الأرض. يصل *المحور القطبي* بين نقطتين مُعينـــتين واقعتين في جهتين متقابلتين من الكرة الأرضية. يُسند لهذه النقاط زاوية الطول *90+* (القطب الشمالي) وزاوية الطول *90-* (*القطب* الجنوبي). يمر *المحور الاستوائي* خارجاً من مركز الكرة الأرضية بزاوية عامودية على المحور القطبي. يُسند له زاوية طول *0*. يكون قياس زاوية العرض موجباً (باتجاه الشمال) وسالباً (باتجاه الجنوب) بالنـــسبة إلى مستوى خط الاستواء. تقاس زاوية الطول الجغرافي بعكس عقارب الساعة (الشرق) ومع عقارب الساعة (الغرب) بالنسبة للمحور القطبي. تكون الزوايا محدودة بالشكل التالي:

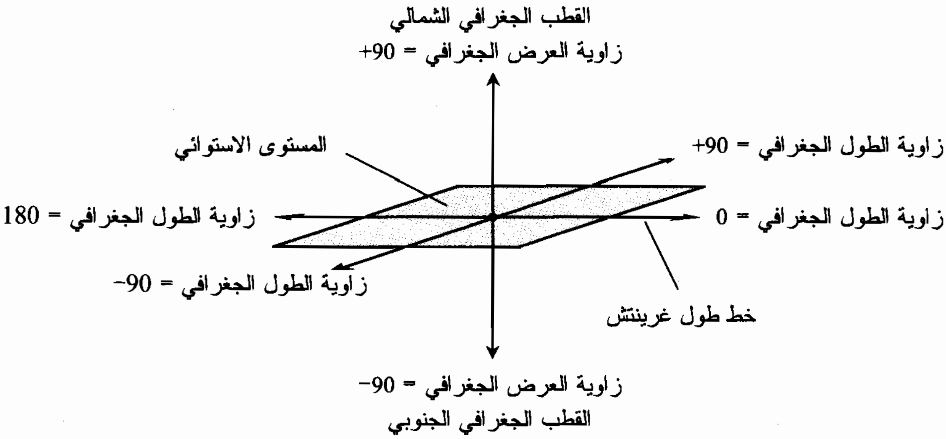
$$- 90^{\circ} \leq \text{زاوية العرض الجغرافي} \leq + 90^{\circ}$$

$$- 180^{\circ} \leq \text{زاوية الطول الجغرافي} \leq + 180^{\circ}$$

على سطح الأرض، يمر نصف الدائرة الذي يصل مستقيم زاوية الطول – صفر مع القطبين من مدينة غرينتش في إنكلترا، ويعرف *بخط طول غرينتش أو الخط الرئيسي*. يجري تحديد زوايا الطول الجغرافي بالنسبة لهذا الخط.

الإحداثيات السماوية

تُعتــــبر *زاوية الطول السماوية وزاوية العرض السماوية* امتداداً لزاوية الطول الجغرافي وزاوية العرض الجغــرافي الأرضية إلى السماء. يظهر الكائن الذي تكون إحداثيات زاوية العرض السماوية وزاوية الطول السماوية له $(x,\ \ y)$ وفق سمت (علوي مباشر) في السماء انطلاقاً من نقطة على سطح الأرض بحيث تكون إحداثيات الطول الجغرافي والعرض الجغرافي له (x, y).



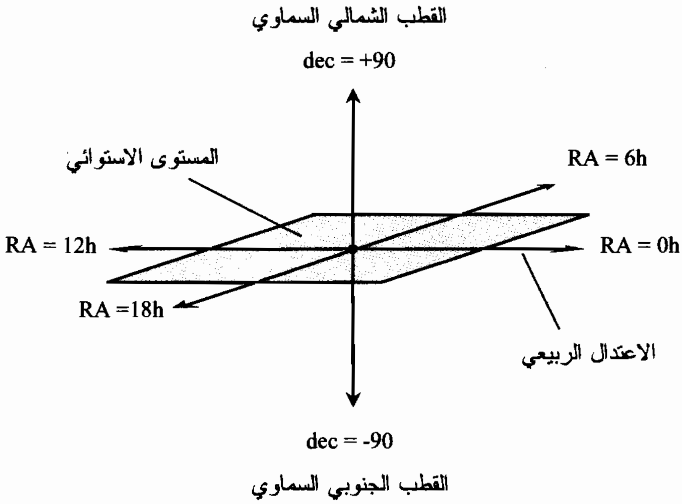
(أ)

الشكل (3- 14- أ): زوايا العرض الجغرافي وزوايا الطول الجغرافي على الكرة الأرضية مقاسة بالدرجات.

يُحــدد *الانحــراف والــصعود القائم* مواضع الكائن في السماء بالنسبة إلى النجوم. يُوظّف الشكل (3-14- ب) في هذا النظام. يتطابق الانحراف (اختصاره *dec*) مع زاوية العرض السماوية. يُقاس الصعود اليمــيني (اختصاره *RA*) شرقاً بدءاً من الشرق من *الاعتدال الربيعي* (موضع الشمس في السماء في اللحظة التي يبدأ فيها فصل الربيع في نصف الكرة الشمالي). يقاس الصعود اليميني بالساعات (يرمز له *h*) بدلاً من الدرجات، حيث يوجد 24 ساعة في 360° دائرة. تكون الزوايا محددة وفق الشكل التالي:

$$-90^\circ \leq dec \leq +90^\circ$$

$$0h \leq RA < 24h$$



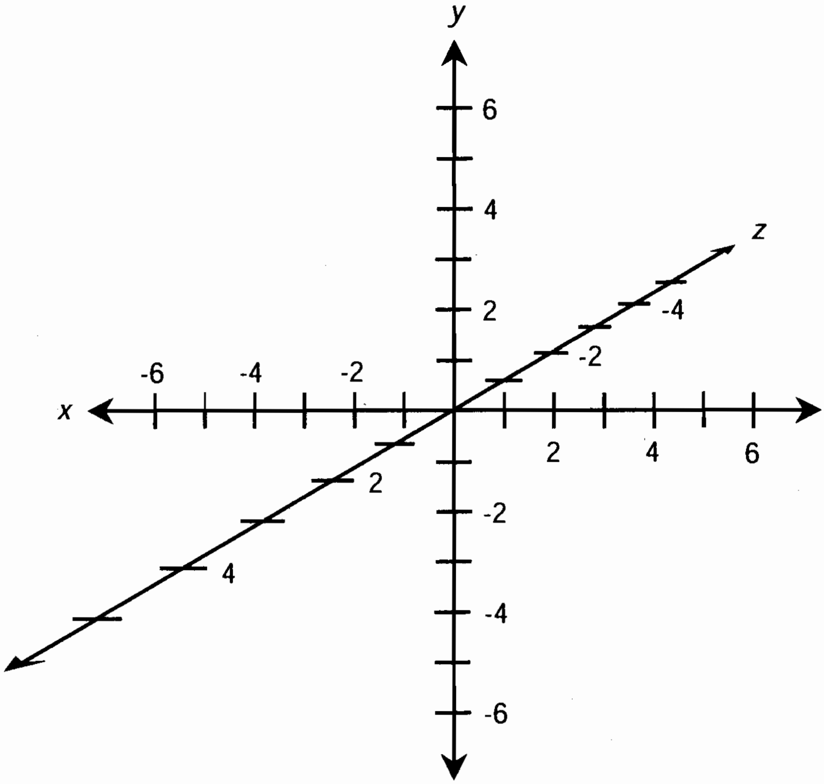
(ب)

الشكل (3-14-ب): يستخدم الانحراف (dec) والصور اليميني (RA) لإيجاد الإحداثيات في السماء.

الفضاء الديكارتي الثلاثي

يُدعــى تمديــد الإحداثيات المتعامدة إلى ثلاثة أبعاد *بالفضاء الديكارتي الثلاثي* (الشكل (3-15))، ويدعى أيضاً *بالفضاء - الثلاثي المتعامد* أو الفضاء *xyz*. تُرسم المتحولات المستقلة عادةً على طول المحاور *x* و*y*؛ ويرسم المتحول غير المستقل على طول المحور *z*. تظهر المنحنيات من هذا النوع كحركة الأفعى حيث تنحني وتتعرج في الفضاء، أو تظهر كسطوح مثل الكرات والقطوع الناقصة، أو كالسفوح الجبلية المتدرجة الــتي تراها في المجلات العلمية. تكون التدريجات عادةً خطية؛ أي يكون تزايد التدريجات نفسه على المقياس بأكمله. ولكن قد تكون تغيّرات هذه المنحنيات غير خطية بدرجة أو درجتين أو ثلاث درجات.

تُعتبر الكمبيوترات أجهزة نفيسة في رسم التوابع في الفضاء الديكارتي الثلاثي. تستطيع الكمبيوترات إظهــار الرســم المنظوري، وتتيح لك رؤية الشكل الحقيقي للسطح المرسوم. يتيح لك برنامج رسم ثلاثي الأبعاد (*3D*) جيد النظَر إلى المنحنى من جميع الزوايا الممكنة، وحتى تدويره أو قلبه في الزمن الحقيقي.



الشكل (3−15): فضاء ديكارتي ثلاثي، يدعى أيضاً بالفضاء الثلاثي المتعامد أو الفضاء xyz.

الإحداثيات الاسطوانية

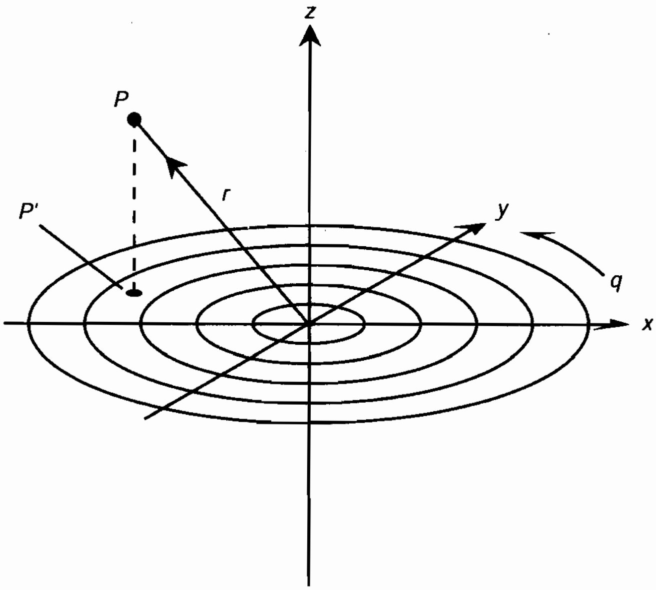
يوضح الشكل (3−16) نظام الإحداثيات الاسطوانية المستخدم لتحديد مواضع النقاط في الفضاء ثلاثي الأبعاد. إذا كان لدينا مجموعة من الإحداثيات الديكارتية أو الفضاء xyz، تُحدَّد الزاوية q في المستوى xy، وتقاس بالراديان بعكس عقارب الساعة انطلاقاً من المحور x. إذا كان لدينا نقطة P في الفضاء، ولنفترض أن مسقطها على المستوى xy هو P'. فإن موضع P يُحدد بالثلاثية (q, r, z) بحيث

q = الزاوية بين P' والمحور x في المستوى xy

r = البعد (نصف القطر) بين P والمبدأ

z = البُعد (ارتفاع) P عن المستوى xy

يمكن التفكير بالإحداثيات الاسطوانية كمستوى قطبي مضافاً له إحداثي الارتفاع لتحديد البعد الثالث.



الشكل (3-16): الإحداثيات الاسطوانية المستخدمة لتحديد النقاط في الفضاء الثلاثي.

الإحداثيات الكروية

يوضح الشكل (3-17) نظام *الإحداثيات الكروية* المستخدم لتحديد النقاط في الفضاء. يشبه هذا النظام نظام زاوية الطول الجغرافي وزاوية العرض الجغرافي مع إضافة نصف القطر r الذي يمثل المسافة بين النقطة P ومبدأ الإحداثيات. يجري تحديد موقع النقطة P بالثلاثية $(long, lat, r)$ بحيث

$Long$ = زاوية الطول للنقطة P

Lat = زاوية العرض للنقطة P

r= البعد (نصف القطر) بين النقطة P ومبدأ الإحداثيات

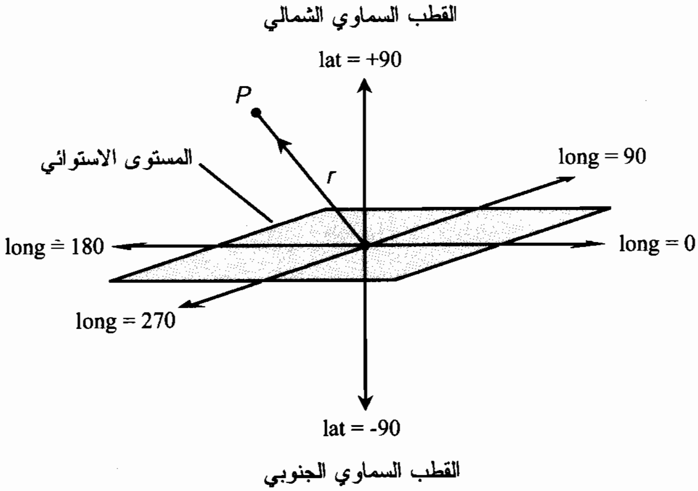
جرى تحديد الزوايا في هذا المثال بالدرجات؛ يمكن بدلاً من ذلك التعبير عن الزوايا بالراديان. يوجد عدة متغيرات في هذا النظام، تدعى جميعها عادةً *بالإحداثيات الكروية*.

الإحداثيات نصف اللوغاريتمية (x - خطي)

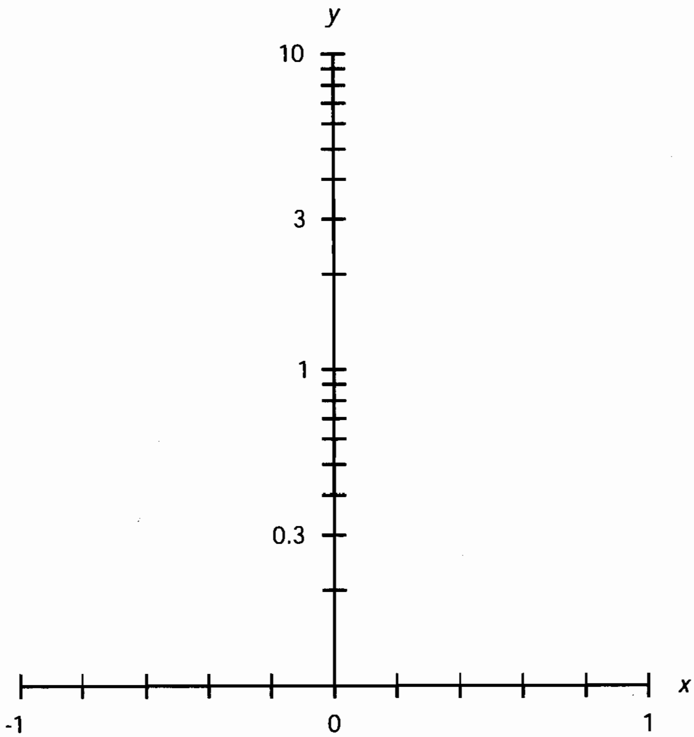
يوضح الشكل (3-18) *الإحداثيات نصف اللوغاريتمية* المستخدمة لتحديد النقاط في جزء من المستوى xy. يكون محور المتحول المستقل خطياً، ويكون محور المتحول غير المستقل لوغاريتمياً. تقتصر القيم العددية التي يمكن رسمها على المحور y على القيم ذات الإشارة الواحدة (موجبة أو سالبة). يمكن رسم التوابع في هذا المثال بحيث تكون منطلقاتها ومستقراتها كما يلي:

$$-1 \leq x \leq 1$$

$$0.1 \leq y \leq 10$$



الشكل (3–17): الإحداثيات الكروية لتحديد النقاط في الفضاء الثلاثي الأبعاد.



الشكل (3–18): المستوى xy نصف اللوغاريتمي،

المحور x خطي والمحور y لوغاريتمي.

يمـــتد المحور y في الشكل (3-18) مرتبتين (بقوى العدد 10). قد يكون الامتداد أكبر أو أصغر من ذلـــك، ولكن لا يمكن في أي حالة أن تكون قيم y صفراً. يمكن في المثال الموضح هنا رسم الربعين الأول والـــثاني من المستوى xy. إذا عكسنا المحور y (جعلنا قيمه سالبة)، سيغطي المستوى الناتج الأجزاء الموافقة للربعين الثالث والرابع.

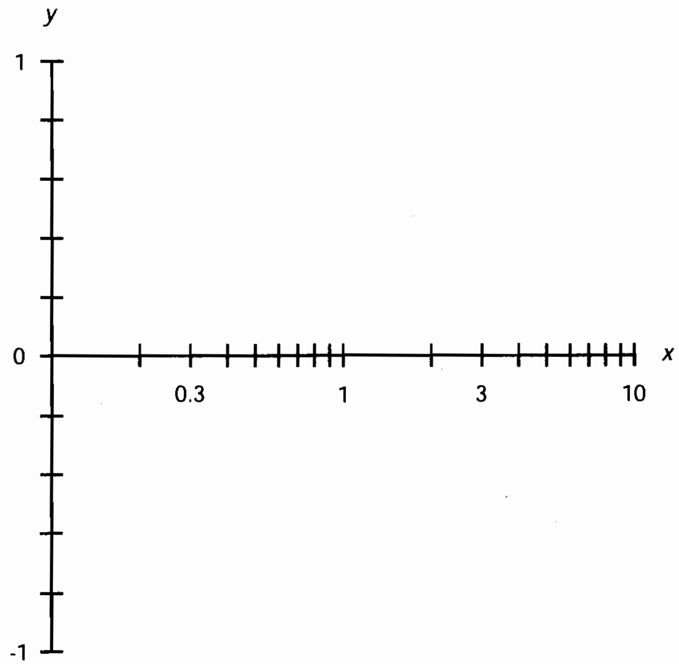
الإحداثيات نصف اللوغاريتمية (y - خطي)

يوضح الشكل (3-19) الإحداثيات نصف اللوغارتيمية المستخدمة لتحديد النقاط الواقعة في جزء من المستوى xy. يكون محور المتحول المستقل لوغاريتمياً، ويكون محور المتحول غير المستقل خطياً. تقتصر القيم العددية التي يمكن رسمها على المحور x على قيم ذات الإشارة الواحدة (موجبة أو سالبة). يمكن رسم التوابع في هذا المثال بحيث تكون منطلقاها ومستقراها كما يلي:

$$0.1 \leq x \leq 10$$

$$-1 \leq y \leq 1$$

يمـــتد المحور x في الشكل (3-19) مرتبتين (بقوى العدد 10). قد يكون الامتداد أكبر أو أصغر من ذلـــك، ولكن لا يمكن في أي حالة أن تكون قيم x صفراً. يمكن في المثال الموضح هنا رسم الربعين الأول والـــرابع من المستوى xy. إذا عكسنا المحور x (جعلنا قيمه سالبة)، سيغطي المستوى الناتج الأجزاء الموافقة للربعين الثاني والثالث.



الشكل (3-19): المستوى xy نصف اللوغاريتمي بمحور x لوغاريتمي ومحور y خطي.

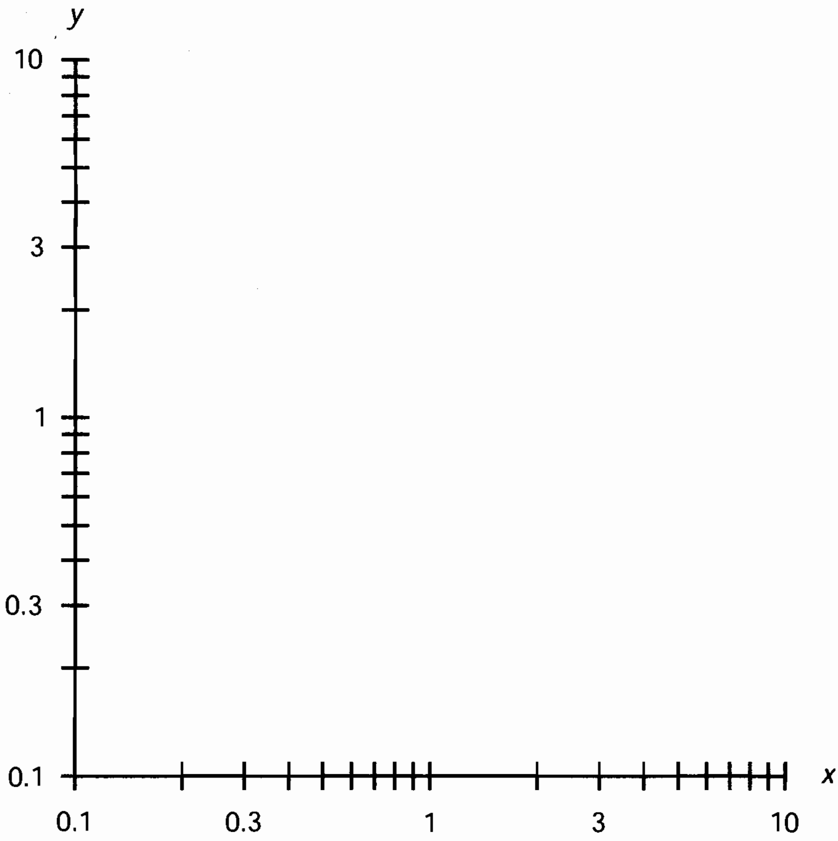
الإحداثيات اللوغاريتمية

يوضح الشكل (3-20) *الإحداثيات اللوغاريتمية* المستخدمة لتحديد النقاط الواقعة في جزء من المستوى xy. كلا المحورين لوغاريتمي. تقتصر القيم العددية التي يمكن رسمها على أي من المحورين على إشارة ذات قيمة واحدة (موجبة أو سالبة). يمكن رسم التوابع بحيث تكون منطلقاتها ومستقراتها كما يلي:

$$0.1 \leq x \leq 10$$

$$0.1 \leq y \leq 10$$

تمتد المحاور في الشكل (3-20) مرتبتين (بقوى العدد 10). قد يكون الامتداد في أي من المحورين أكبر أو أصغر من ذلك، ولكن لا يمكن في أي حالة أن تكون القيم صفراً. يمكن في المثال الموضح هنا رسم الربع الأول من المستوى xy فقط. إذا عكسنا إشارة أحد المحاور أو كليهما، سيغطي المستوى الناتج الأجزاء الموافقة لأي من الأرباع الثلاثة الأخرى.



الشكل (3-20): المستوى xy اللوغاريتمي.

امتحان موجز

عــد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت على ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

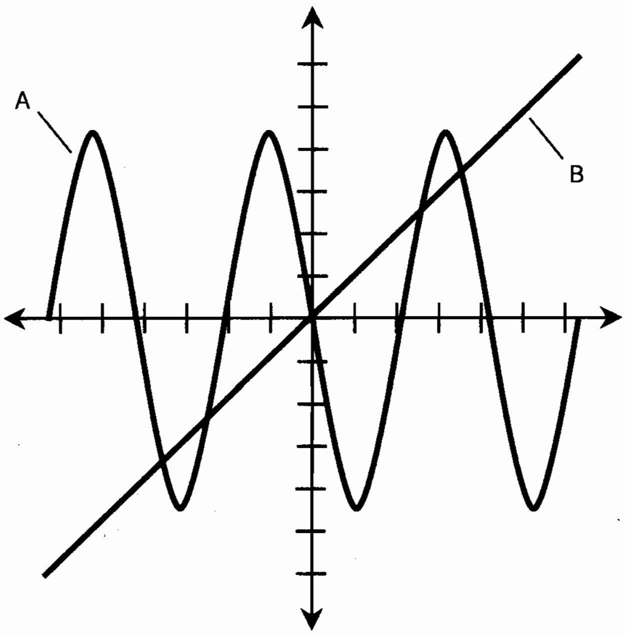
1. يحدد المستوى القطبي النقاط وفقاً
   (a) لإحداثيتي مسافة.
   (b) لمسافة وزاوية.
   (c) لزاويتين.
   (d) لمسافة وزاويتين.
2. افتــرض أنك ترسم منحنيات معادلتين في المستوى الديكارتي، وتتلاقى المنحنيات في نقطة واحدة. ما هو عدد الحلول المشتركة لمجموعة المعادلتين؟
   (a) لا يوجد.
   (b) واحد.
   (c) اثنان.
   (d) لا يوجد معلومات كافية للحصول على النتيجة.
3. في مستوى الإحداثيات نصف اللوغاريتمي،
   (a) كلا المحورين نصف لوغاريتمي.
   (b) محور نصف لوغاريتمي والآخر لوغاريتمي.
   (c) أحد المحاور خطي والآخر لوغاريتمي.
   (d) كل من المحورين خطي.
4. ما هو الشكل العام لمنحنى المعادلة $x^2 + y^2 = 16$ عند رسمها في الإحداثيات الديكارتية؟
   (a) خط مستقيم.
   (b) قطع مكافئ.
   (c) دائرة.
   (d) لا يوجد معلومات كافية لمعرفة الشكل.
5. ما هي معادلة المسألة 4 إذا رسُمت في الإحداثيات القطبية، حيث r نصف القطر وq الزاوية؟
   (a) $r = 4$.
   (b) $q = 4$.

(c) $r^2 + q^2 = 16$.

(d) لا يوجد معلومات كافية لمعرفة المعادلة.

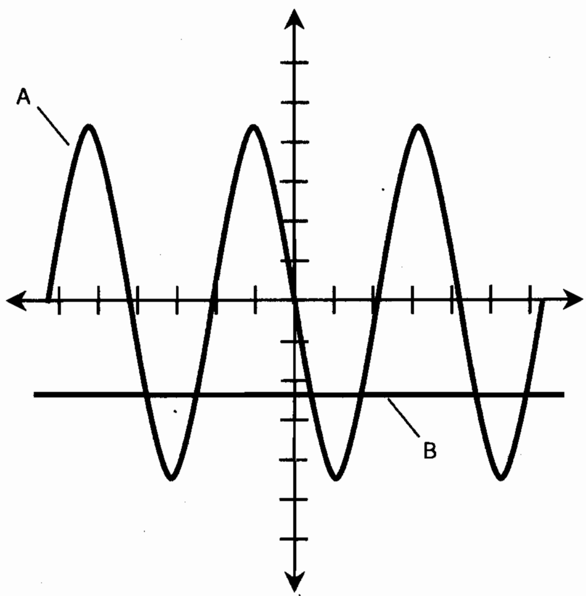
6. مـــا هو مستوى الإحداثيات ثلاثي الأبعاد المشروح في هذا الفصل، والذي تُحدَّد النقطة فيه بواسطة ثلاث زوايا مختلفة بالنسبة إلى محور مرجعي؟
   (a) مستوى الإحداثيات القطبية.
   (b) مستوى الإحداثيات الاسطوانية.
   (c) مستوى الإحداثيات الكروية.
   (d) ولا أي مستوى من المستويات السابقة.

7. افترض أننا رسمنا معادلتين ومنحنياهما A وB موضحة في الشكل (3-21). افترض أن المنحنيين ممتدان بشكل لا نهائي في الاتجاهين. ما هو عدد الحلول المشتركة لهاتين المعادلتين؟
   (a) لا يوجد أي حل.
   (b) عدة حلول.
   (c) عدد لا نهائي من الحلول.
   (d) يستحيل معرفة عدد الحلول المشتركة.

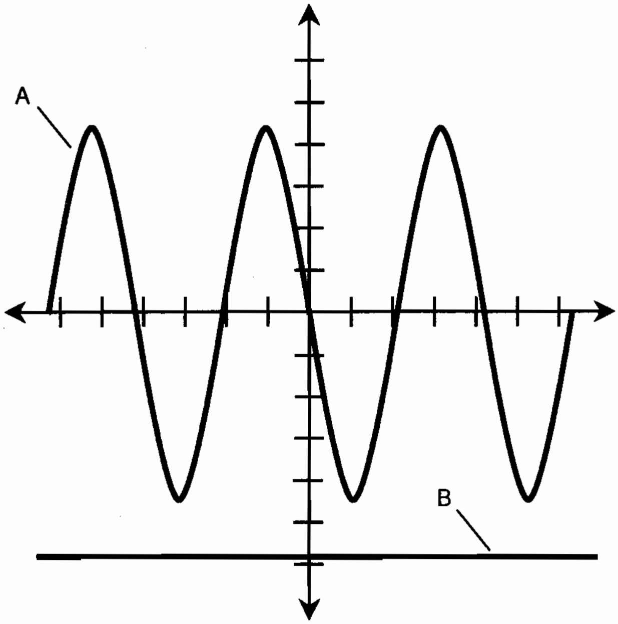


الشكل (3-21): رسم توضيحي للمسألة 7. منحنيات المعادلتين A وB.
افترض أن المنحنيين ممتدان بشكل لا نهائي.

8. افترض أننا رسمنا معادلتين ومنحنياهما A وB موضحة في الشكل (3–22). افترض أن المنحنيين ممتدان بشكل لا نهائي. ما هو عدد الحلول المشتركة لهاتين المعادلتين؟
   (a) لا يوجد أي حل.
   (b) عدة حلول.
   (c) عدد لا نهائي من الحلول.
   (d) يستحيل معرفة عدد الحلول المشتركة.
9. افترض أننا رسمنا معادلتين ومنحنياهما A وB موضحة في الشكل (3–23). افترض أن المنحنيين ممتدان بشكل لا نهائي. ما هو عدد الحلول المشتركة لهاتين المعادلتين؟
   (a) لا يوجد أي حل.
   (b) عدة حلول.
   (c) عدد لا نهائي من الحلول.
   (d) يستحيل معرفة عدد الحلول المشتركة.
10. في أي مستوى إحداثيات لا يمتد أي من المحاور باتجاه الصفر؟
   (a) الإحداثيات المتعامدة.
   (b) الإحداثيات الاسطوانية.
   (c) الإحداثيات الكروية.
   (d) الإحداثيات اللوغاريتمية.



الشكل (3–22): رسم توضيحي للمسألة 8، منحنيا المعادلتين A وB. افترض أن المنحنيين ممتدان بشكل لا نهائي.



الشكل (3-23): رسم توضيحي للمسألة 9. منحنيا المعادلتين A و B.
افترض أن المنحنيين ممتدان بشكل لا نهائي.

الفصل 4

أسس الهندسة

إذا تصفحت الآن ما تبقى من هذا الفصل فإنك قد تقول "يتوقع الشخص المجنون فقط أن أتذكر كل هــذا". لا تقلــق. ليس عليك تذكر جميع الصيغ؛ إنها متوفرة في الكتب (مثل هذا الكتاب) ومتوفرة على الإنتــرنت. تــستحق القوانين الأكثر استخداماً كنظرية فيثاغورث المتعلقة بالمثلث القائم، وصيغة مساحة الدائــرة التذكــر وبالتالي ليس عليك أن تسرع إلى المراجع في كل مرة تحتاج فيها لحساب أمر ما. ولكن، يعود إليك مدى ما تريد تذكره.

إن إجراء الحسابات بهذه الصيغ قبل الغوص في الفيزياء فكرة جيدة ستجعلك مرتاحاً لاحقاً. لذلك، راجع هذه الصيغ، تأكد من قدرتك على التعامل معها، ثم قدم الامتحان الموجز في نهاية الفصل. الامتحان الموجــز "مفتوح" ككل الامتحانات الموجزة الموجودة في نهايات الفصول في هذا الكتاب. قد تُراجع نص الفــصل أثناء تقديم الامتحان الموجز وبالتالي يمكنك إيجاد الصيغة التي تحتاجها. سيصبح الأمر إذاً مجرد نقر أزرار الآلة الحاسبة وربما البحث عن مخططات تساعدك على تصور ما يجري.

القواعد الأساسية

تُستخدم القواعد الهندسية الأساسية بشكل واسع في الفيزياء والهندسة. وتعود هذه القواعد إلى عصر المــصريين القدماء والإغريقيين، الذين استخدموا الهندسة لحساب قطر الأرض وبعد الأرض عن القمر. لقد وظفــوا قــوانين *الهندسة الإقليدية* (نسبة إلى الرياضي إقليدس الذي عاش قبل آلاف السنين). ولكن عليك القيام بأكثر أو أقل مما كان على إقليدس القيام به بهذه القواعد، فهذه القواعد واضحة، وهي قواعد مقتضبة وصرفة.

مبدأ النقطتين

لنفترض أن P وQ نقطتان هندسيتان منفصلتان. وبالتالي فالعبارات التالية صحيحة، كما هو موضح في الشكل (4-1):

الشكل (4-1): مبدأ النقطتين.

- تقع كل من P وQ على مستقيم مشترك واحد L.
- المستقيم L هو المستقيم الوحيد الذي تقع عليه كل من النقطتين P وQ.

مبدأ الثلاث نقاط

لنفترض أن P وQ وR ثلاث نقاط غير واقعة على استقامة واحدة. وبالتالي فالعبارات التالية صحيحة:

- تقع النقاط P وQ وR في مستوى إقليدي واحد S.
- المستوى S هو المستوى الإقليدي الوحيد الذي تقع عليه النقاط الثلاث.

مبدأ n نقطة

لنفترض أن P_1، P_2، P_3، ...، P_n، n نقطة منفصلة لا تقع جميعها في فضاء إقليدي بُعْدُه $n-1$. وبالتالي فالعبارات التالية صحيحة:

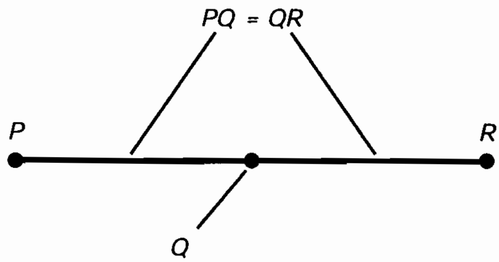
- تقع النقاط P_1، P_2، P_3، ...، وP_n في فضاء إقليدي مشترك U بُعْدُه n.
- الفضاء U ذو البعد n هو الفضاء الإقليدي الوحيد الذي تقع عليه النقاط n.

تدوين المسافة

نرمز للمسافة بين أي نقطتين P وQ مُقاسةً من P باتجاه Q على طول خط مستقيم يصل بينهما بكتابة PQ.

مبدأ المنتصف

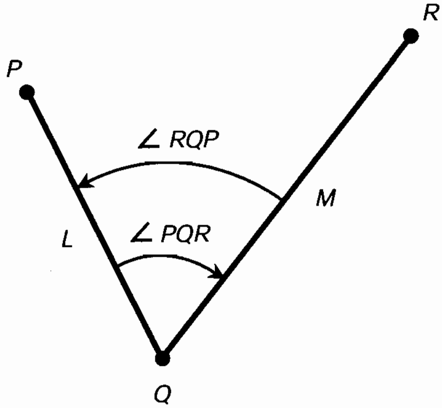
لنفترض أنه لدينا قطعة مستقيمة تصل بين نقطتين P وR. وبالتالي يوجد ويوجد فقط نقطة واحدة Q على القطعة المستقيمة بين P وR تحقق $PQ = QR$. يوضح الشكل (4- 2) ذلك.



الشكل (4-2): مبدأ المنتصف.

تدوين الزاوية

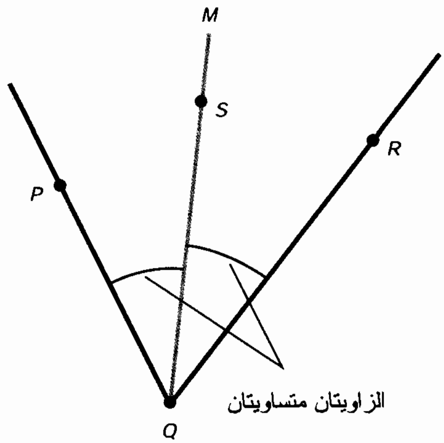
تخـــيل أن P وQ وR ثـــلاث نقاط منفصلة. ولتكن L القطعة المستقيمة الواصلة بين P وQ؛ ولتكن M القطعـــة المـــستقيمة الواصلة بين R وQ. وبالتالي يمكن كتابة الزاوية بين L وM مُقاسةً في النقطة Q في المستوى المحـــدد بالـــنقاط الثلاث على الشكل $\angle QR$ أو على الشكل $\angle RQP$. إذا جرى تحديد اتجاه دوران لعملية القياس، سيشير عندها $\angle PQR$ إلى الزاوية المقاسة من L إلى M وسيشير $\angle RQP$ إلى الزاوية مُقاسةً من M إلى L (الشكل (4-3)). قد ترمز هذه التدوينات أيضاً إلى قياسات الزوايا، ويعبّر عنها بالدرجات أو الراديان.



الشكل (4-3): تدوين الزاوية وقياسها.

مُنصّف الزاوية

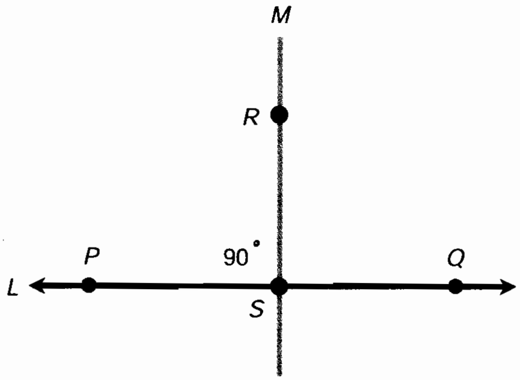
لنفترض أنه لدينا الزاوية PQR $\angle$ وقياسها أصغر من 180°، وهي محددة بالنقاط الثلاث P، وQ، وR كما هو موضح في الشكل (4-4). بالتالي يوجد شعاع واحد فقط M يُنصِّف الزاوية PQR $\angle$. إذا كانت S نقطة ما من M مختلفة عن Q، فإن $\angle SQR = \angle PQS$. يوجد شعاع واحد وواحد فقط يقسم الزاوية إلى نصفين.



الشكل (4-4): مبدأ مُنصّف الزاوية.

التعامد

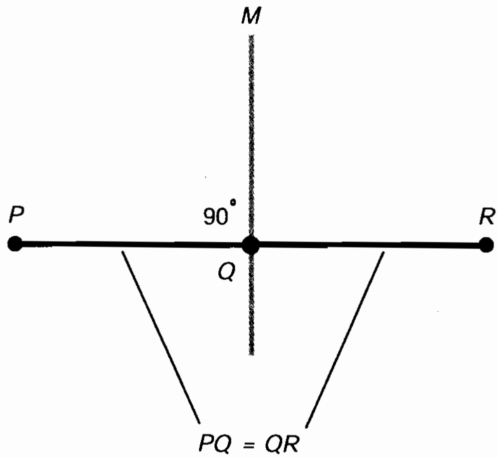
افتـــرض أن المستقيم L يمر بالنقطتين P وQ. ولتكن R نقطة لا تنتمي إلى المستقيم L. بالتالي يوجد مـــستقيم واحـــد وواحـــد فقط M يمرّ من R ويقطع المستقيم L في نقطة ما S وبحيث يكون M عامودي على L. يوضح الشكل (4-5) ذلك.



الشكل (4-5): مبدأ التعامد.

مُنصّف القطعة المستقيمة

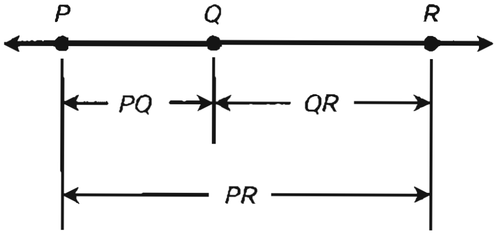
افتـــرض أن L قطعـــة مـــستقيمة تـــصل بـــين النقطـــتين P وR. يـــوجد مستقيم واحد وواحد فقـــط M يقطـــع القطعـــة المـــستقيمة L في الـــنقطة Q بحـــيث تكـــون المسافة من P إلى Q مساوية للمسافة من Q إلى R. وبالتالي يوجد لكل قطعة مستقيمة مُنصِّف عامودي واحد ويوضح الشكل (4-6) ذلك.



الشكل (4-6): مبدأ مُنصّف القطعة المستقيمة.

جمع وطرح المسافات

لتكن P، وQ، وR نقاطاً واقعة على المستقيم L بحيث تكون Q بين P وR. وبالتالي تُعبِّر المعادلات التالية عن المسافات مُقاسة على طول المستقيم L (الشكل (4-7)):



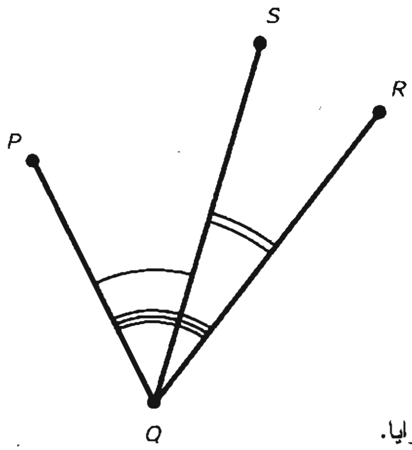
الشكل (4-7): جمع وطرح المسافات.

$$PQ + QR = PR$$
$$PR - PQ = QR$$
$$PR - QR = PQ$$

جمع وطرح الزوايا

لتكن P، وQ، وR، وS أربع نقاط واقعة في مستوى مشترك. ولتكن النقطة Q رأس الزوايا الثلاث $\angle PQR$، و$\angle PQS$، و$\angle SQR$، كما هو موضح في الشكل (4-8). وبالتالي تُعبِّر المعادلات التالية عن قياسات الزوايا:

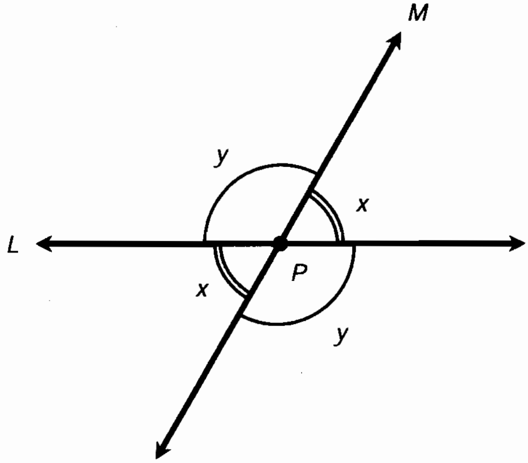
$$\angle PQS + \angle SQR = \angle PQR$$
$$\angle PQR - \angle PQS = \angle SQR$$
$$\angle PQR - \angle SQR = \angle PQS$$



الشكل (4-8): جمع وطرح الزوايا.

الزوايا المتقابلة بالرأس

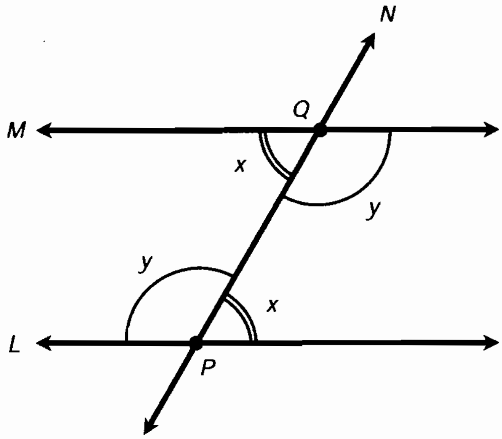
لنفترض أن L وM مستقيمان متقاطعان في النقطة P. تدعى الزوايا المتقابلة بالرأس كزوج الزوايا x وزوج الزوايا y الموضحة في الشكل (4-9) بالزوايا المتقابلة بالرأس وهي متساوية دائماً.



الشكل (4-9): الزوايا المتقابلة بالرأس متساوية.

الزوايا المتبادلة داخلياً

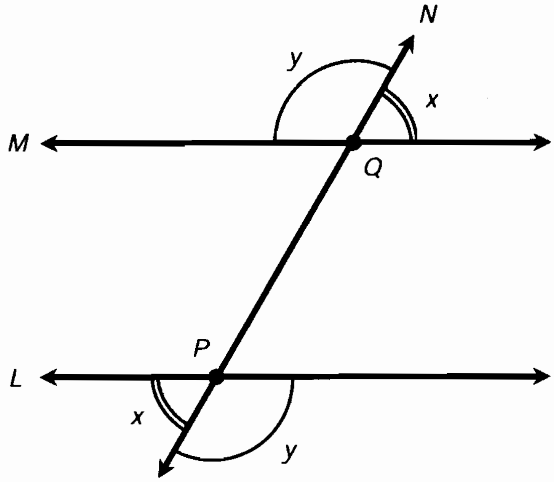
لنفترض أن المستقيمين L وM مستقيمان متوازيان وليكن N مستقيماً يقطع L وM بالنقطتين P وQ علـــى التوالي. تُدعى الزوايا المشار إليها x في الشكل (4-10) *بالزوايا المتبادلة داخلياً*؛ وينطبق الأمر نفسه على الزوايا المشار إليها y. الزوايا المتبادلة داخلياً متساوية. يكون المستقيم N عامودياً على المستقيمين L و M إذا وفقط إذا كان $x = y$.



الشكل (4-10): الزوايا المتبادلة داخلياً متساوية.

الزوايا المتبادلة خارجياً

لنفترض أن المستقيمين L وM مستقيمان متوازيان. وليكن N مستقيماً يقطع L وM بالنقطتين P وQ على التوالي. تُدعى الزوايا المشار إليها x في الشكل (4–11) *بالزوايا المتبادلة خارجيًا*؛ وينطبق الأمر نفسه على الزوايا المشار إليها y. الزوايا المتبادلة خارجياً متساوية. يكون المستقيم N عامودياً على المستقيمين L و M إذا وفقط إذا كان $x = y$.



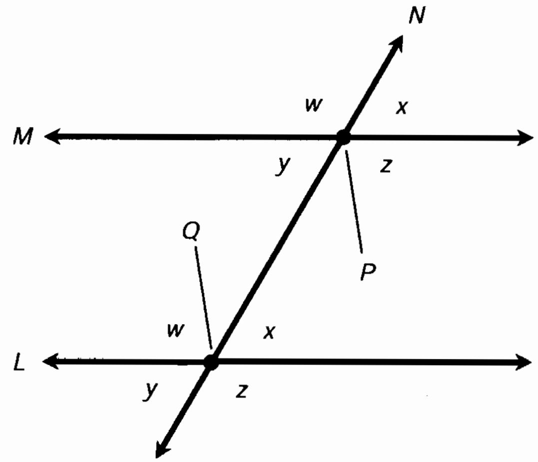
الشكل (4–11): الزوايا المتبادلة خارجياً متساوية.

الزوايا المتناظرة

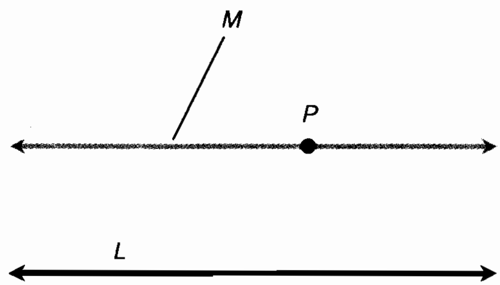
لنفترض أن المستقيمين L وM مستقيمان متوازيان. وليكن N مستقيماً معترضاً يقطع L وM بالنقطتين P وQ على التوالي. تُدعى الزوايا المشار إليها w في الشكل (4–12) *بالزوايا المتناظرة*؛ وينطبق الأمر نفسه على الزوايا المشار إليها x، وy، وz. الزوايا المتناظرة متساوية. يكون المستقيم N عامودياً على المستقيمين L وM إذا وفقط إذا كان $w = x = y = z = 90° = \pi/2$ راديان، أي إذا وفقط إذا كانت الزوايا الأربع قائمة.

مبدأ التوازي

لنفترض أن L مستقيماً وP نقطة غير واقعة عليه. يوجد مستقيم واحد وواحد فقط M يمرّ من P ويوازي L (الشكل (4–13)). يشكل هذا المبدأ أحد أهم المسلمات في الهندسة الإقليدية. يمكن أن ننفي هذا المبدأ بطريقتين: إما لا يوجد مستقيم كهذا المستقيم، أو يوجد أكثر من مستقيم مثل هذا المستقيم مثلاً M_1، M_2، وM_3،... يشكل أي شكل من أشكال نفي هذا المبدأ حجر الزاوية للهندسة اللاإقليدية الهامة للفيزيائيين ولعلماء الفلك المهتمين بنظريات النسبية العامة وعلم الفلك.



الشكل (4-12): الزوايا المتناظرة متساوية.



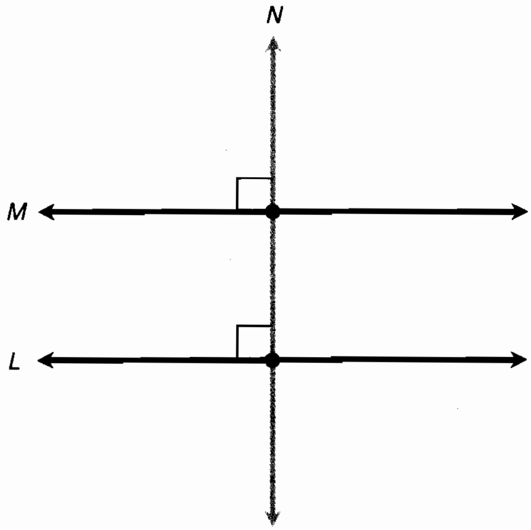
الشكل (4-13): مبدأ التوازي.

التعامد المتبادل

ليكن L وM مستقيمين واقعين في المستوى نفسه. افترض أن كلا المستقيمين L وM يقطعان مستقيماً ثالثاً N، وأن كلاً من L وM عامودي على N. بالنتيجة يكون المستقيمان L وM متوازيين (الشكل (4-14)).

المثلثات

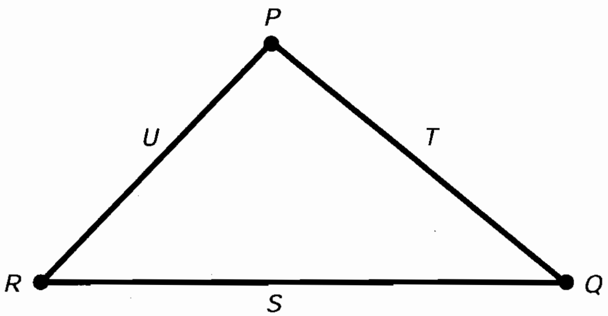
قد تفكر بالمثلثات عند ذكر الهندسة المستوية إذا مرّ على دراستك لها مدة ما. قد تتذكر أنه كان عليك تعلم جميع أنواع البراهين النظرية المتعلقة بالمثلثات باستخدام جداول "الخطوات والتعليل" إذا كان معلمك صارماً، وقد تتذكر الطرق الأقل رسمية إذا لم يكن معلمك محافظاً إلى حدّ بعيد. حسناً، ليست البراهين مطلوبة منك هنا ثانية، ولكن تستحق بعض الحقائق الأكثر أهمية حول المثلثات أن نذكرها.



لشكل (4-14): التعامد المتبادل.

نقطة - نقطة - نقطة

لـــتكن P، وQ، وR ثـــلاث نقاط منفصلة غير واقعة على استقامة واحدة. وبالتالي تكون العبارات التالية صحيحة (الشكل (4-15)).



الشكل (4-15): مبدأ النقاط الثلاث؛ مثلثات ضلع - ضلع - ضلع.

- تقع النقاط P، وQ، وR على رؤوس المثلث T.
- T هو المثلث الوحيد الذي تكون رؤوسه P، وQ، وR.

ضلع - ضلع - ضلع

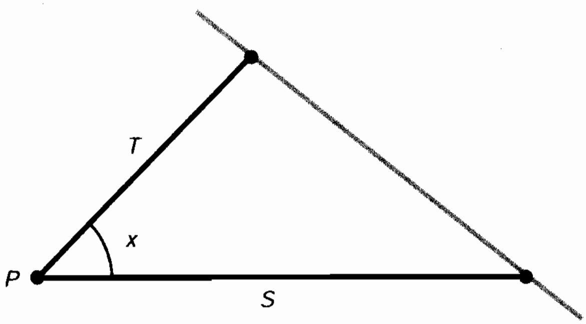
لتكن S، وT، وU ثلاث قطع مستقيمة. وليكن s، وt، وu، أطوال هذه القطع المستقيمة على التوالي. ولنفتـــرض أننا وصلنا نهايات S، وT، وU في النقاط P، وQ، وR (راجع الشكل (4-15)). بالنتيجة فإن

العبارات التالية صحيحة:

- تُحدد القطع المستقيمة S، وT، وU مثلثاً.
- يكون هذا المثلث وحيداً بحجمه وشكله وأضلاعه S، وT، وU.
- جميع المثلثات التي تكون أطول أضلاعها s، وt، وu متطابقة (متماثلة في الحجم والشكل).

ضلع - زاوية - ضلع

لتكن S وT قطعتين منفصلتين. ولتكن P نقطة نهايتي كل من القطعتين المستقيمتين. أُشير إلى أطوال S وT بالأحـــرف الصغيرة s وt على التوالي. افترض أن كلاً من S وT يشكلان زاوية x رأسها النقطة P (الشكل (4-16)). وبالتالي تكون العبارات التالية صحيحة:



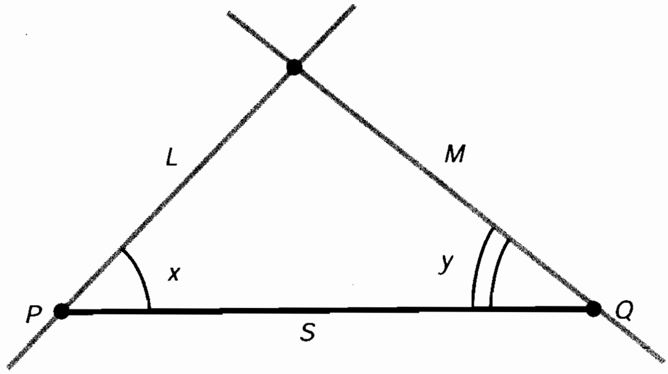
الشكل (4-16): مثلثات ضلع - زاوية - ضلع.

- تُحدد S، وT، وx مثلثاً.
- المثلث الذي تكون أضلاعه S وT ويشكلان زاوية x في النقطة P هو مثلث وحيد.
- جميع المثلثات التي تحوي ضلعين أطوالهما s وt ويشكلان زاوية x هي مثلثات متطابقة.

زاوية - ضلع - زاوية

لـــتكن S قطعـــة مستقيمة طولها s وطرفاها النقطتان P وQ. لتكن x وy الزوايا المشكلة بواسطة S وبالمستقيمين L وM اللذين يمران بالنقطتين P وQ على التوالي (الشكل (4-17)). وبالتالي تكون العبارات التالية صحيحة:

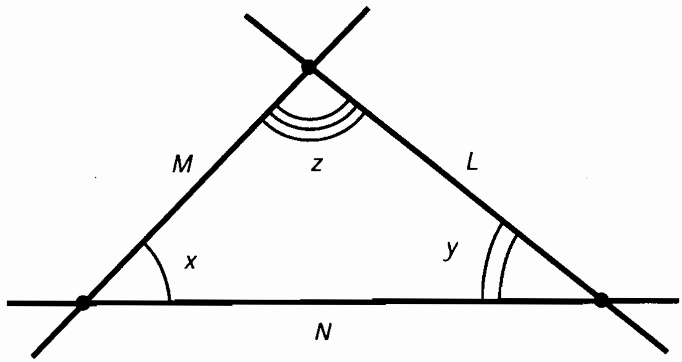
- تُحدد S، وx، وy مثلثاً.
- المثلث المحدد بواسطة S وx، وy هو مثلث وحيد.
- جميع المثلثات التي تحتوي على ضلع طوله s، وضلعاه الآخران يشكلان الزاويتين x وy مع الضلع الذي طوله s هي مثلثات متطابقة.



الشكل (4-17): مثلثات زاوية - ضلع - زاوية.

زاوية - زاوية - زاوية

لتكن L، وM، وN مستقيمات واقعة في مستوى مشترك، وتتقاطع في ثلاث نقاط كما هو موضح في الشكل (4-18). ولتكن الزوايا في هذه النقاط هي x، وy، وz. وبالتالي تكون العبارات التالية صحيحة:

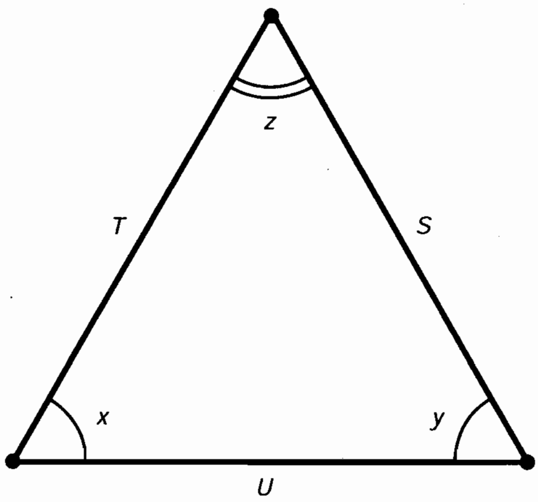


الشكل (4-18): مثلثات زاوية - زاوية - زاوية.

- يوجد عدد لا نهائي من المثلثات التي تكون زواياها الداخلية x، وy، وz.
- جميع المثلثات التي تمتلك زوايا x، وy، وz هي مثلثات متشابهة (لها الشكل نفسه ولكن ليس بالضرورة أن يكون لها الحجم نفسه).

المثلث متساوي الضلعين

لنفترض أنه لدينا مثلث أضلاعه S، وT، وU وأطوالها s، وt، وu. ولتكن x، وy، وz الزوايا المقابلة للأضلاع S، وT، وU على التوالي (الشكل (4-19)). افترض أن أياً من المعادلات التالية محقق:



الشكل (4–19): المثلثات متساوية الضلعين والمتساوية الأضلاع.

$$s = t$$

$$t = u$$

$$s = u$$

$$x = y$$

$$y = z$$

$$x = z$$

بالنتيجة المثلث هو مثلث *متساوي الضلعين* والعبارات المنطقية التالية صالحة:

إذا كان $s = t$، فإن $x = y$.

إذا كان $t = u$، فإن $y = z$.

إذا كان $s = u$، فإن $x = z$.

إذا كان $x = y$، فإن $s = t$.

إذا كان $y = z$، فإن $t = u$.

إذا كان $x = z$، فإن $s = u$.

المثلث متساوي الأضلاع

افتــــرض أنه لدينا مثلث أضلاعه S، وT، وU وأطوالها s، وt، وu. ولتكن x، وy، وz الزوايا المقابلة للأضلاع S، وT، وU على التوالي (راجع الشكل (4–19)). افترض أن أياً من العبارتين التاليتين صحيحة:

$$s = t = u \quad \text{أو} \quad x = y = z$$

وبالتالي نقول أن المثلث *متساوي الأضلاع* والعبارات المنطقية التالية صحيحة:

إذا كان $s = t = u$، فإن $x = y = z$.

إذا كان $x = y = z$، فإن $s = t = u$.

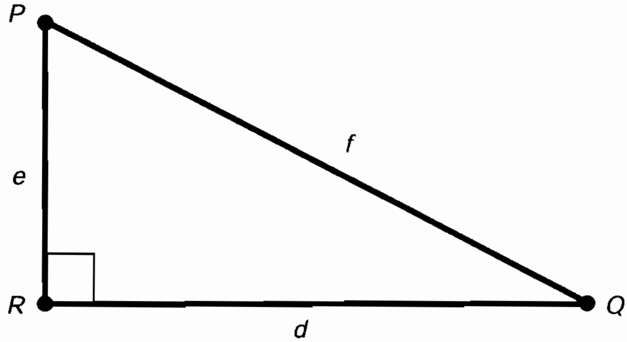
وبالتالي لجميع المثلثات *متساوية الأضلاع* الشكل نفسه؛ جميعها متشابهة.

نظرية فيثاغورث

افتـــرض أنه لدينا المثلث قائم الزاوية المحدد بالنقاط P، وQ، وR وأضلاعه D، وE، وF وأطوالها d، وe، وf على التوالي. ليكن f الضلع المقابل للزاوية القائمة (الشكل (4–20)). وبالتالي تكون المعادلة التالية دائماً صحيحة:

$$d^2 + e^2 = f^2$$

وعكس هذه النظرية صحيح أيضاً: إذا وُجد مثلث أطوال أضلاعه d، وe، وf والمعادلة السابقة محققة، يكون المثلث عندها مثلثاً قائم الزاوية.



الشكل (4–20): نظرية فيثاغورث.

محيط المثلث

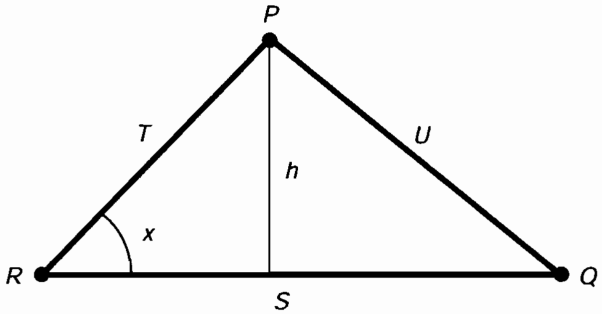
افتـــرض أنه لدينا المثلث المحدد بالنقاط P، وQ، وR وأضلاعه S، وT، وU أطوالها s، وt، وu على التوالي كما هو موضح في الشكل (4–21). ليكن s طول القاعدة، وh الارتفاع، وx الزاوية المحصورة بين الضلعين اللذين أطوالهما s وt. وبالتالي يُعطى محيط المثلث B بالصيغة التالية:

$$B = s + t + u$$

المساحة الداخلية للمثلث

ليكن لدينا المثلث المحدد سابقاً؛ عُد مرة أخرى إلى الشكل (4–21). يمكن إيجاد المساحة الداخلية A باستخدام الصيغة:

$$A = sh/2$$



الشكل (4-21): محيط ومساحة المثلث.

الأشكال الرباعية

يدعى الشكل الهندسي الذي يحوي أربعة أضلاع والموجود في مستوى واحد *بالشكل الرباعي*. يوجد عـدة تصنيفات وصيغ متنوعة يمكن تطبيقها على كل شكل. هذه بعض أكثر الصيغ شيوعاً والتي يمكن أن تكون مفيدة في الفيزياء.

أقطار متوازي الأضلاع

افتـرض أن لديـنا متوازي أضلاع محدداً بالنقاط الأربع P، وQ، وR، وS. لتكن D قطعة مستقيمة تصل بين P وR كما هو موضح في الشكل (4-22-أ). وبالتالي يكون D *القطر الثانوي* (الصغير) لمتوازي الأضلاع، والمثلثات المحددة بواسطة القطر D متطابقة:

$$\Delta PQR \equiv \Delta RSP$$

لـتكن E قطعـة مستقيمة تصل بين Q، وS (راجع الشكل (4-22-ب)). وبالتالي يكون E *القطر الرئيسي* (الكبير) لمتوازي الأضلاع، والمثلثات المحددة بواسطة E متطابقة:

$$\Delta QRS \equiv \Delta SPQ$$

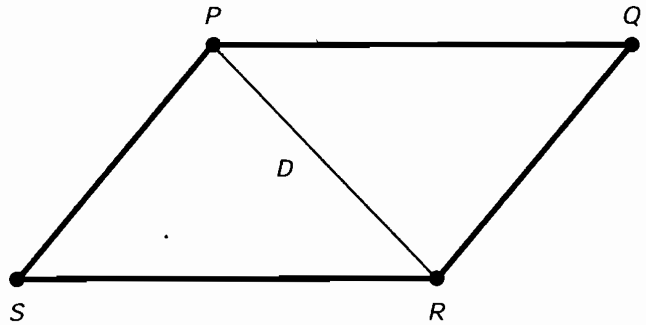
تنصيف أقطار متوازي الأضلاع

افترض أن لدينا متوازي أضلاع محدداً بالنقاط الأربع P، وQ، وR، وS. وليكن D القطر الواصل بين P وR؛ ولـيكن E القطـر الواصل بين Q وS (الشكل (4-23)). وبالتالي يُنصِّف كل من D وE الآخر بنقطة التقاطع T. بالإضافة لذلك، فإن أزواج المثلثات التالية متطابقة:

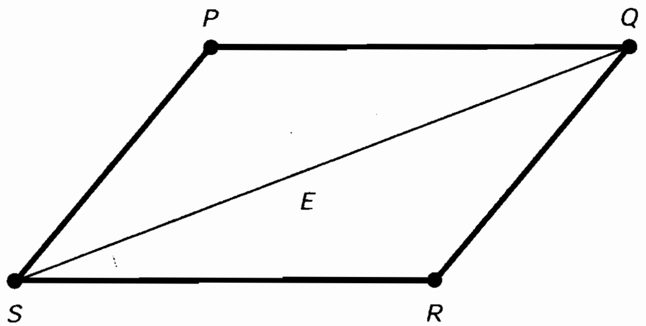
$$\Delta PQT \equiv \Delta RST$$

$$\Delta QRT \equiv \Delta SPT$$

إن عكـس مـا سبق صحيح أيضاً: إذا كان لدينا شكل رباعي أقطاره تُنصِّف بعضها، يكون هذا الشكل متوازي أضلاع.

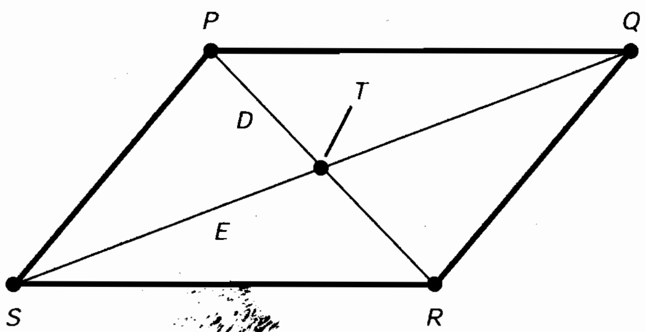


(أ)



(ب)

الشكل (4-22): المثلثات المحددة بالقطر الثانوي (أ) أو القطر الرئيسي (ب) لمتوازي الأضلاع متطابقة.



الشكل (4-23): أقطار متوازي الأضلاع تُنصِّف بعضها.

المستطيل

افترض أنه لدينا متوازي أضلاع مُحدداً بالنقاط الأربع P، وQ، وR، وS. افترض أن أياً من العبارات التالية صحيحة بالنسبة للزوايا مقاسة بالدرجات:

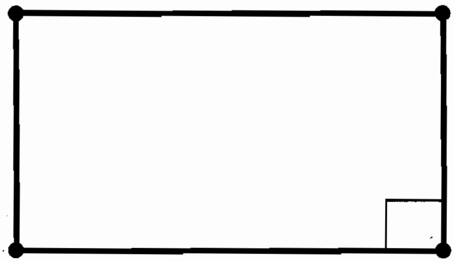
$$\angle PQR = 90^0 = \pi/2 \text{ راديان}$$

$$\angle QRS = 90^\circ = \pi/2 \text{ راديان}$$

$$\angle RSP = 90^\circ = \pi/2 \text{ راديان}$$

$$\angle SPQ = 90^\circ = \pi/2 \text{ راديان}$$

وبالتالي يكون قياس جميع الزوايا الداخلية 90°، ويكون متوازي الأضلاع *مستطيلاً*، وهو مُضلَّع رباعي زواياه الداخلية متطابقة جميعها (الشكل (4–24))، وبالتالي يكون قياس أي زاوية داخلية مساوياً 90°.



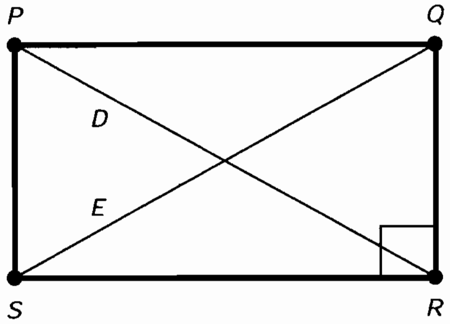
الشكل (4–24): إذا كانت إحدى الزوايا الداخلية لمتوازي الأضلاع قائمة، يكون متوازي الأضلاع مستطيلاً.

أقطار المستطيل

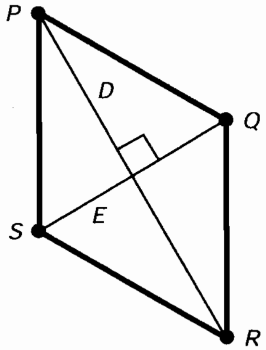
افترض أنه لدينا متوازي أضلاع مُحدَّداً بالنقاط الأربع P، وQ، وR، وS. ليكن D القطر الواصل بين P وR؛ ليكن E القطر الواصل بين Q وS. لنُشر إلى طول D بالحرف d؛ ولنشر إلى طول E بالحرف e (الشكل (4–25)). إذا كان $d = e$، فإن متوازي الأضلاع مستطيل. العكس صحيح أيضاً: إذا كان متوازي الأضلاع مستطيلاً، فإن $d = e$. نستنتج أن متوازي الأضلاع يكون مستطيلاً إذا وفقط إذا كانت أقطاره متساوية الطول.

أقطار المُعيَّن

افترض أنه لدينا متوازي الأضلاع مُحدَّداً بالنقاط الأربع P، وQ، وR، وS. ليكن D القطر الواصل بين P وR؛ ليكن E القطر الواصل بين Q وS. إذا كان D عامودياً على E، فإن متوازي الأضلاع *مُعَّين*، المُعيَّن هو عبارة عن مُضلَّع رباعي أضلاعه متساوية الطول (الشكل (4–26)). العكس صحيح أيضاً: إذا كان متوازي الأضلاع *مُعَيَّنا*، فإن D عامودي على E. نستنتج أن متوازي الأضلاع يكون مُعيَّناً إذا وفقط إذا كانت أقطاره متعامدة.



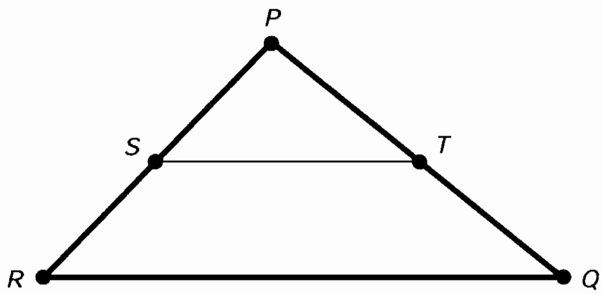
الشكل (4-25): أقطار المستطيل متساوية الطول.



الشكل (**4-26**): أقطار المُعيَّن متعامدة.

شبه المنحرف داخل المثلث

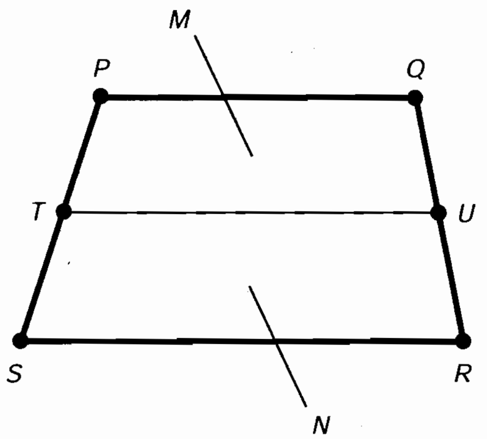
لنفتــرض أن لدينا مثلثاً محدداً بالنقاط الثلاث P، وQ، وR. لتكن S منتصف الضلع PR، ولتكن T منتـــصف الضلع PQ. بالنتيجة، القطع المستقيمة ST وRQ متوازية، والشكل $STQR$ شبه منحرف، وهو مُضلَّع رباعي فيه ضلعان متقابلان متوازيان (الشكل (4-27)). بالإضافة لذلك، فإن طول القطعة المستقيمة ST مساوٍ لنصف طول القطعة المستقيمة RQ.



الشكل (4-27): شبه المنحرف داخل المثلث.

متوسط شبه المنحرف

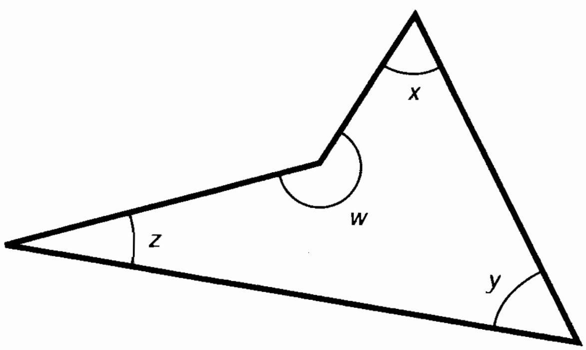
لنفترض أنه لدينا شبه المنحرف المحدد بالنقاط الأربع P، وQ، وR، وS. ليكن T منتصف الضلع PS، وليكن U منتصف الضلع QR. تُدعى القطعة المستقيمة TU *بمتوسط شبه المنحرف* $PQRS$. ليكن M المُضلّع المحدد بالنقاط P، وQ، وU، وT. ليكن N المُضلّع المحدد بالنقاط T، وU، وR، وS. وبالتالي يكون كل من M وN شبه منحرف (الشكل (4–28)). بالإضافة لذلك، يكون طول القطعة المستقيمة TU مساوياً لنصف مجموع أطوال القطع المستقيمة PQ وSR. أي أن طول TU هو متوسط (بالمعنى الحسابي) أطوال PQ وSR.



الشكل (4–28): متوسط شبه المنحرف.

مجموع الزوايا الداخلية للشكل الرباعي

لنفترض أن لدينا شكلاً رباعياً زواياه الداخلية w، وx، وy، وz (الشكل (4–29)). وبالتالي فالمعادلة التالية محققة إذا كانت الزوايا مُقاسةً بالدرجات:



الشكل (4–29): الزوايا الداخلية للشكل الرباعي.

$$w + x + y + z = 360^{\circ}$$

أما إذا كانت الزوايا مُقاسةً بالراديان، فالمعادلة التالية محققة:

$$w + x + y + z = 2\pi$$

محيط متوازي الأضلاع

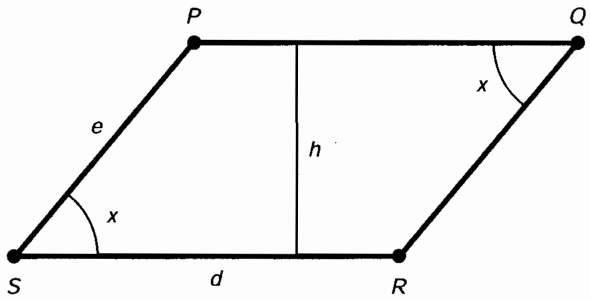
لنفترض أن لدينا متوازي أضلاع محدداً بالنقاط P، وQ، وR، وS وأطوال أضلاعه d وe كما هو موضح في الشكل (4–30). وليكن d طول القاعدة وh طول الارتفاع. وبالتالي يُعطى محيط متوازي الأضلاع B بالصيغة التالية:

$$B = 2d + 2e$$

المساحة الداخلية لمتوازي الأضلاع

لنفترض أنه لدينا متوازي الأضلاع المحدد سابقاً في الشكل (4–30). تُعطى المساحة الداخلية A

$$A = dh$$



الشكل (4–30): محيط ومساحة متوازي الأضلاع. إذا كان $d = e$ فالشكل مُعيَّن.

محيط المُعيَّن

لنفترض أنه لدينا المُعيَّن المحدد بالنقاط P، وQ، وR، وS وأطوال جميع أضلاعه متساوية. المُعيَّن هو حالة خاصة لمتوازي الأضلاع (راجع الشكل (4–30)) بحيث يكون $e = d$. دعنا نُشير إلى جميع أطوال أضلاع المُعيَّن بالحرف d. يُعطى محيط المُعيَّن B بالصيغة التالية:

$$B = 4d$$

المساحة الداخلية للمُعيَّن

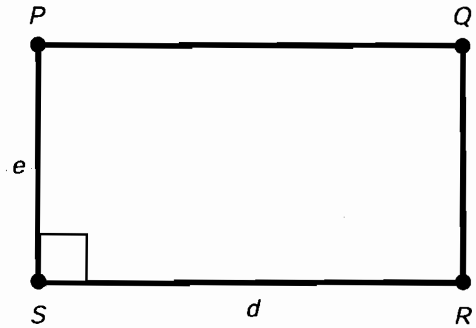
لنفترض أنه لدينا المُعيَّن المحدد سابقاً في الشكل (4–30). تُعطى المساحة الداخلية A

$$A = dh$$

محيط المستطيل

لنفترض أنه لدينا المستطيل المحدد بالنقاط P، وQ، وR، وS وأطوال أضلاعه d وe كما هو موضح في الشكل (4–31). ليكن d طول القاعدة وليكن e طول الارتفاع. وبالتالي يُعطى محيط المستطيل B بالصيغة التالية:

$$B = 2d + 2e$$



الشكل (4–31): محيط ومساحة المستطيل. إذا كان $d = e$ فالشكل مربع.

المساحة الداخلية للمستطيل

لنفترض أنه لدينا المستطيل المحدد سابقاً في الشكل (4–31). تُعطى المساحة الداخلية A

$$A = de$$

محيط المربع

لنفتــــرض أنه لدينا المربع المحدد بالنقاط P، وQ، وR، وS وأطوال جميع أضلاعه متساوية. المربع هو حالة خاصة للمستطيل (راجع الشكل (4–31)) يكون فيها $d = e$. ولنُشر إلى أطوال الأضلاع بالحرف d. يُعطى محيط المربع B بالصيغة التالية:

$$B = 4d$$

المساحة الداخلية للمربع

لنفترض أنه لدينا المربع المحدد سابقاً بالشكل (4–31). تُعطى المساحة الداخلية A

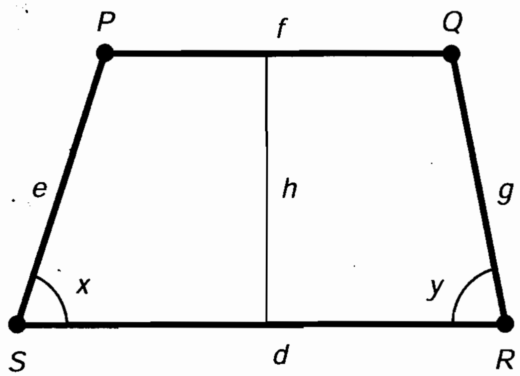
$$A = d^2$$

محيط شبه المنحرف

لنفتــــرض أنه لدينا شبه المنحرف المحدد بالنقاط P، وQ، وR، وS وأطوال أضلاعه d، وe، وf، وg

كمـــا هو موضح في الشكل (4–32). ليكن d طول قاعدة شبه المنحرف، وh ارتفاعه، ولتكن x الزاوية المحـــصورة بين الضلعين d وe. ولتكن y الزاوية المحصورة بين الضلعين d وg. لنفترض أن الضلعين اللذين لديهما الطولين d وf متوازيان (القطع المستقيمة RS وPQ). وبالتالي يكون محيط شبه المنحرف B

$$B = d + e + f + g$$



الشكل (4–32): محيط ومساحة شبه المنحرف.

المساحة الداخلية لشبه المنحرف

لنفتــرض أنـــه لديـــنا شـــبه المنحرف المحدد سابقاً في الشكل (4–32). تُعطى المساحة الداخلية A بالصيغة:

$$A = (dh + fh)/2$$

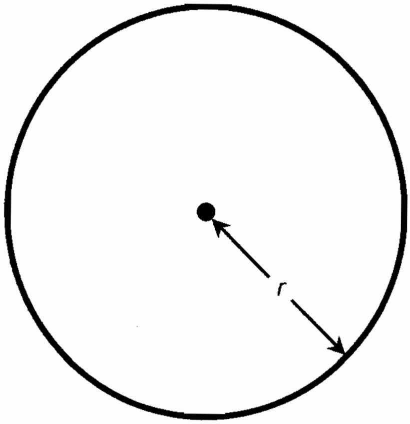
الدوائر والقطوع الناقصة

مـــا ذكـــرناه بـــشأن الخطوط المستقيمة كاف. دعنا نتناول المنحنيات في المستوى. من جهة تُعتبر الـــصيغ التالية أسهل اشتقاقاً بالنسبة للرياضيين من اشتقاق صيغ الأشكال المُكوَّنة من مستقيمات وزوايا؛ ومـــن جهـــة أخـــرى، فـــإن صيغ المنحنيات أكثر إزعاجاً. ولكن لحسن الحظ، نحن فيزيائيون، وقد قام الرياضـــيون بالعمـــل كلـــه من أجلنا. إن كل ما نحتاج للقيام به هو أخذ الصيغ وتوظيفها وفق ما تقتضيه الحالة.

محيط الدائرة

لنفترض أن لدينا دائرة نصف قطرها r كما هو موضح في الشكل (4–33). يُعطى المحيط B، والذي يدعى أيضاً *بمحيط الدائرة*، للدائرة بالصيغة التالية:

$$B = 2\pi r$$



الشكل (4−33): محيط ومساحة الدائرة.

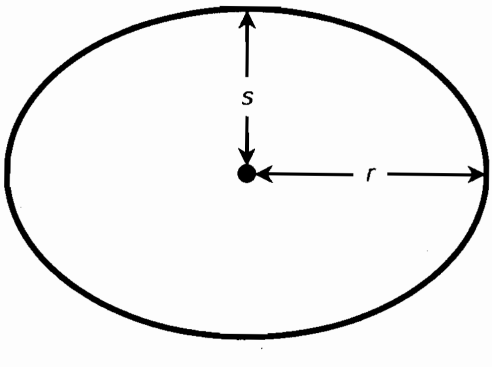
المساحة الداخلية للدائرة

لنفتـــرض أنه لدينا دائرة كالدائرة المحددة سابقاً في الشكل (4−33). يمكن إيجاد المساحة الداخلية A للدائرة باستخدام هذه الصيغة:

$$A = \pi r^2$$

محيط القطع الناقص

لنفتـــرض أن لديـــنا قطعاً ناقصاً بحيث يكون طول نصف - المحور الرئيسي r (المحور المحرقي) وطول نـــصف المحـــور - الثانوي s (المحور اللامحرقي) كما هو موضح في الشكل (4−34). وبالتالي يُعطى محيط القطع الناقص B بالصيغة التقريبية التالية:



الشكل (4−34): محيط ومساحة القطع الناقص.

$$B \approx 2\pi \left[(r^2 + s^2)/2\right]^{1/2}$$

المساحة الداخلية للقطع الناقص

لنفترض أن لدينا قطعاً ناقصاً كالقطع المحدد سابقاً في الشكل (4-34). تُعطى المساحة الداخلية للقطع بالصيغة

$$A = \pi rs$$

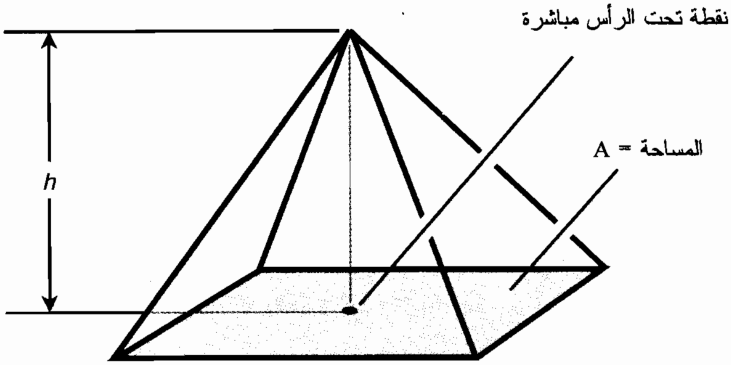
مساحة السطح والحجم

والآن دعـــنا ننـــتقل من ثنائي الأبعاد إلى ثلاثي الأبعاد. هذه بعض الصيغ العامة لمساحات السطوح وحجـــوم المُجسَّمات الهندسية. الفضاء الثلاثي المعني هو فضاء ثلاثي *مسطح*، أي أنه يخضع لقوانين الهندسة الإقليدية. هذه الصيغ صحيحة في الفيزياء النيوتنية (على الرغم من أنها غير صحيحة في الفيزياء النسبية).

حجم الهرم

لنفتـــرض أن لديـــنا هـــرماً قاعدته مُضلَّع مساحته A وارتفاعه h (الشكل (4-35)). يُعطى حجم الهرم V بالصيغة

$$V = Ah/3$$



الشكل (4-35): حجم الهرم.

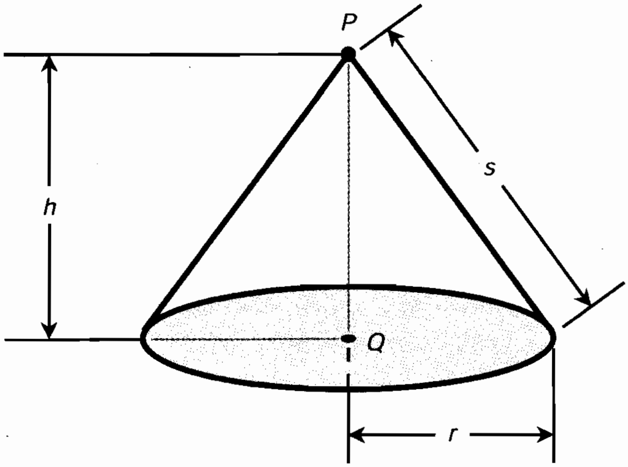
مساحة سطح المخروط

لنفتـــرض أن لدينا مخروطاً قاعدته دائرة. وليكن P رأس المخروط، وليكن Q مركز القاعدة (الشكل (4-36)). لنفـــرض أن القطعة المستقيمة PQ عامودية على القاعدة بحيث يكون الكائن عبارة عن *مخروط دائري قائم*. ليكن r نصف قطر القاعدة، وليكن h ارتفاع المخروط (طول القطعة المستقيمة PQ)، وليكن s طول حرف المخروط مقاساً من أي نقطة على الدائرة والقمة P. بالتالي تُعطى مساحة سطح المخروط S (متضمنة القاعدة) بإحدى الصيغتين التاليتين:

$$S = \pi r^2 + \pi rs$$
$$S = \pi r^2 + \pi r (r^2 + h^2)^{½}$$

تُعطى مساحة المخروط T (لا تتضمن القاعدة) بإحدى الصيغتين التاليتين:

$$T = \pi rs$$
$$T = \pi r (r^2 + h^2)^{½}$$

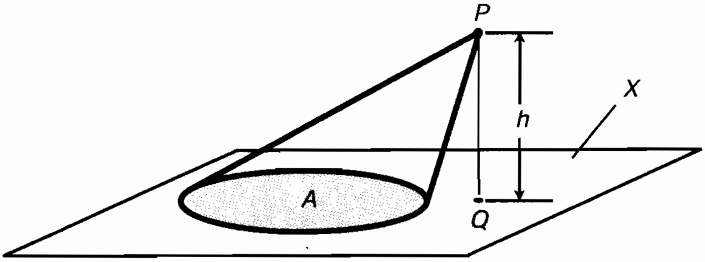


الشكل (4-36): مساحة سطح المخروط الدائري القائم.

حجم المُجسَّم المخروطي

لنفتــرض أن لديــنا مخروطاً قاعدته منحنٍ مستوى مغلق لا على التعيين. لتكن A المساحة الداخلية لقاعـــدة المخروط. ليكن P رأس الهرم، ولتكن Q نقطة في المستوى X الذي يحوي القاعدة، وبحيث تكون القطعـــة المـــستقيمة PQ عامـــودية على X (الشكل (4-37)). ليكن h ارتفاع المخروط (طول القطعة المستقيمة PQ) وبالتالي يُعطى حجم المُجسَّم المخروطي

$$V = Ah/3$$

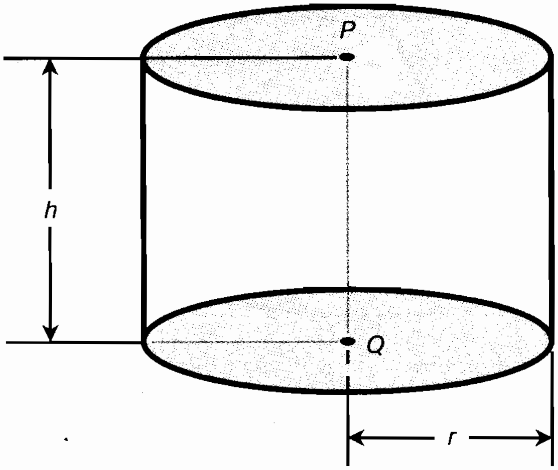


الشكل (4-37): حجم مُجسَّم مخروطي عام.

مساحة سطح الاسطوانة الدائرية القائمة

لنفترض أن لدينا اسطوانة قاعدتها دائرة. وليكن P مركز دائرة قمة الاسطوانة، وليكن Q مركز دائرة قاعدة الاسطوانة (الشكل (4-38)). افترض أن القطعة المستقيمة PQ عامودية على كل من دائرتي القمة والقاعدة، وبالتالي يكون لدينا *اسطوانة دائرية قائمة*. ليكن r نصف قطر الاسطوانة، وليكن h ارتفاعها (طول القطعة المستقيمة PQ). وبالتالي تُعطى مساحة سطح الاسطوانة S (متضمنة لمساحة دائرتي القمة والقاعدة)

$$S = 2\pi rh + 2\pi r^2 = 2\pi r\,(h + r)$$



الشكل (4-38): مساحة وحجم الاسطوانة الدائرية القائمة.

وتُعطى مساحة الاسطوانة T (غير متضمنة لمساحة دائرتي القمة والقاعدة)

$$T = 2\pi rh$$

حجم المُجسَّم الاسطواني الدائري القائم

لنفترض أنه لدينا اسطوانة كالاسطوانة المحددة أعلاه (انظر للشكل (4-38)). يُعطى حجم V *المُجسَّم الاسطواني الدائري القائم* الموافق

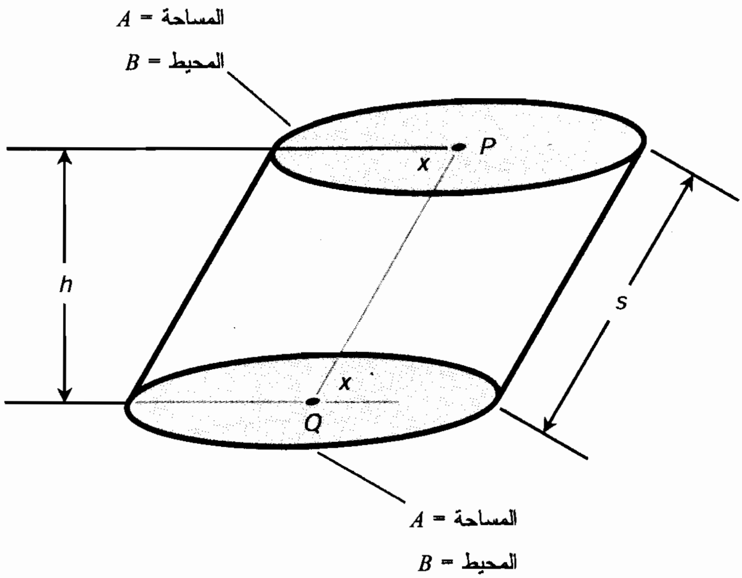
$$V = \pi r^2 h$$

مساحة سطح اسطوانة عامة

لنفترض أنه لدينا *اسطوانة عامة* قاعدتها أي منحنٍ مستوى مغلق. لتكن A المساحة الداخلية لقاعدة الاسطوانة (بالتالي المساحة الداخلية لدائرة قمة الاسطوانة). ليكن B محيط دائرة القاعدة (بالتالي محيط دائرة القمة أيضاً). ليكن h ارتفاع الاسطوانة أو المسافة العامودية الفاصلة بين المستويات التي تحوي دائرتي القمة

والقاعـــدة. لـــتكن x الزاوية بين المستوى الذي يحوي دائرة القاعدة وأي قطعة مستقيمة PQ تصل النقاط الموافقة P وQ بين دائرة القمة ودائرة القاعدة، على التوالي. ليكن S طول حرف الاسطوانة أو طول القطعة المستقيمة PQ (الشكل (4–39)). وبالتالي تُعطى مساحة سطح الاسطوانة S (متضمنة لمساحة دائرتي القمة والقاعدة)

$$S = 2A + Bh$$



الشكل (4–39): مساحة سطح وحجم اسطوانة عامة ومُجسَّم مغلق.

مساحة سطح الاسطوانة T (غير متضمنة لمساحة دائرتي القمة والقاعدة)

$$T = Bh$$

حجم مُجسَّم اسطواني عام

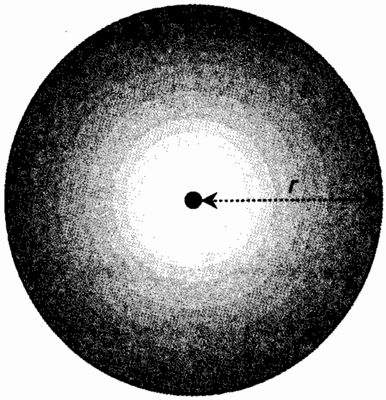
لنفترض أنه لدينا اسطوانة كالاسطوانة المحددة أعلاه (انظر للشكل (4–39)). يُعطى حجم V *المُجسَّم الاسطواني العام* الموافق

$$V = Ah$$

مساحة سطح الكرة

لنفتـــرض أنه لدينا كرة نصف قطرها r، كما هو موضح في الشكل (4–40). تُعطى مساحة سطح الكرة A

$$A = 4\pi r^2$$



الشكل (4-40): مساحة سطح وحجم كرة ومُجسَّم مغلق.

حجم مُجسَّم كروي

لنفترض أن لدينا كرة كالكرة المحددة أعلاه في الشكل (4-40). يُعطى الحجم V لُمجسَّم كروي

$$V = 4\pi r^3/3$$

مساحة سطح المكعب

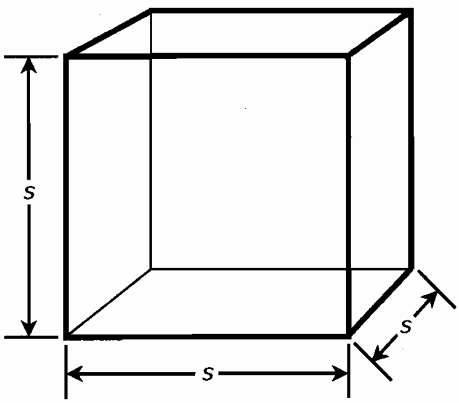
لنفترض أن لدينا مكعباً طول حروفه s، كما هو موضح في الشكل (4-41). تُعطى مساحة سطح المكعب A

$$A = 6s^2$$

حجم مُجسَّم تكعيبي

لنفترض أن لدينا مكعباً كالمكعب المحدد أعلاه في الشكل (4-41). يُعطى الحجم V لُمجسَّم تكعيبـــي

$$V = s^3$$



الشكل (4-41): مساحة سطح وحجم مكعب ومُجسَّم مغلق.

مساحة سطح موشور قاعدته مستطيل (متوازي المستطيلات)

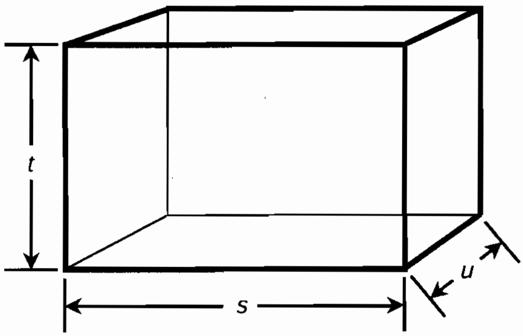
لنفتـــرض أنـــه لدينا موشور قاعدته مستطيل أطوال حروفه s، وt، وu، كما هو موضح في الشكل (4-42). تُعطى مساحة سطح الموشور A

$$A = 2st + 2su + 2tu$$

حجم موشور قاعدته مستطيلة (متوازي المستطيلات)

لنفتـــرض أن لديـــنا موشـــوراً قاعدتـــه مستطيلة (متوازي المستطيلات)كالموشور المحدد في الشكل (4-42). يُعطى الحجم V للمُجسَّم المغلق

$$V = stu$$



الشكل (4-42): مساحة سطح وحجم موشور قاعدته مستطيلة ومُجسَّم مغلق.

امتحان موجز

عـــد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت على ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. جزيء كروي حجمه 8.000×10^{-9} متر مكعب. ما هو نصف قطر الجزيء؟
   (a) 5.12×10^{-28} ميلي متر.
   (b) 2.000×10^{-3}ميلي متر.
   (c) 1.241 ميلي متر.
   (d) 512 ميلي متر.
2. يـــبلغ نـــصف قطـــر الأرض تقـــريباً 6,400 كيلومتـــر (km) تقريباً. ما هي مساحة سطح الأرض بالكيلومترات المربعة؟ خذ بالاعتبار رقمين معنويين. افترض أن الأرض كرة كاملة.

(a) 1.28×10^8

(b) 5.1×10^8

(c) 1.1×10^{12}

(d) لا يمكن حساب المساحة من هذه المعلومات.

3. افترض أن لديك صندوقاً مكعباً طول كل من حروفه الداخلية متر واحد بالضبط. افترض أنك أُعطيت كومة من المكعبات الصغيرة، طول حرف كل منها 1 سنتيمتر، وطُلب منك تكديس المكعبات بشكل مرتب في الصندوق. وأُبلغت أنك ستحصل على 10 سنتات لقاء كل مكعب تقوم بترتيبه في الصندوق. كم ستكسب إذا انتهيت من هذه المهمة؟

(a) \$10.00.

(b) \$100.00.

(c) \$1,000.00.

(d) ولا أي قيمة من القيم الواردة أعلاه.

4. افترض أنك تقف في قاعدة بحيرة سطحها هادئ، بدون أمواج. القاعدة مسطحة ومستوية. قمت بإطلاق شعاع ليزري باتجاه السطح بزاوية تميل على الأفق بمقدار 20°. ما هي الزاوية التي ستشكلها الحزمة الليزرية مع السطح، مُقاسةً بالنسبة إلى مستوى السطح؟

(a) 70°.

(b) 35°.

(c) 20°.

(d) 10°.

5. افترض أنه لديك وعاء أسطوانياً قطره 10.00 سنتمترات وارتفاعه 20.00 سنتمتراً. ما هو حجم هذا الوعاء بالسنتمتر المكعب؟ ليكن الجواب بأربعة أرقام هامة. وافترض أن $\pi = 3.14159$

(a) 1,571.

(b) 6,283.

(c) 628.3.

(d) 1,257.

6. إذا تضاعف نصف قطر الكرة، تزداد مساحة سطحها بعامل مقداره

(a) 2.

(b) 4.

(c) 8.

(d) 16.

7. إذا تضاعف نصف قطر قرص مسطح، متناه البعد، تزداد مساحة سطحه بعامل مقداره
(a) 2.
(b) 4.
(c) 8.
(d) 16.

8. لنفترض أنه لدينا عينة من مادة مُعيَّنة كتلتها 6.000 كيلوغرام وجرى حزمها في صندوق أبعاده 10 سنتمترات عرض و20 سنتمتر عمق و30 سنتمتر ارتفاع. ما هي كتلة السنتمتر المكعب من هذه المادة، على افتراض أن كثافتة منتظمة؟
(a) 0.1000 غرام.
(b) 1.000 غرام.
(c) 10.00 غرام.
(d) 100.0 غرام.

9. لنفترض أننا وضعنا مُزوِّداً ضوئياً في مركز كرة نصف قطرها 100 متر. إذا تضاعف نصف القطر إلى 200 متر، ماذا سيحدث للطاقة الكلية للضوء الذي يضيء داخل الكرة؟
(a) لن تتغير.
(b) ستنقسم إلى النصف.
(c) ستصبح ¼ ما سبق.
(d) لا يوجد معلومات كافية هنا لحسابها.

10. لنتخيل مثلثين، أحدهما له قاعدة طولها 3 أمتار، وارتفاعه 4 أمتار وطول وتره 5 أمتار. للمثلث الثاني قاعدة طولها 15 سنتمتراً، وارتفاعه 20 سنتمتراً، وطول وتره 25 سنتمتراً. ماذا يمكننا أن نقول عن المثلثين
(a) كلاهما مثلث متساوي الضلعين.
(b) يمكن تطبيق نظرية فيثاغورث على كلا المثلثين.
(c) المثلثان متطابقان.
(d) كل ما ذُكر أعلاه صحيح.

الفصل 5

اللوغاريتمات، والتوابع الأسية، وعلم المثلثات

يحتوي هذا الفصل على صيغ مشابهة لصيغ الفصل الرابع. راجع هذه الصيغ، تأكد من قدرتك على استخدامها في إجراء الحسابات، ثم قدم الامتحان الموجز "المفتوح" في نهاية الفصل. ليس مطلوباً منك تذكر هذه الصيغ كل على حدة، ولكن عليك تذكرها عندما تراها. إذا احتجت لمراجعة إحدى الصيغ، يمكنك بهذه الطريقة تناول الكتاب من الرف والبحث عنها.

إذا لم تكن آلتك الحاسبة قادرة على التعامل مع اللوغاريتمات، والتوابع الأسية، وعمليات رفع "x للقوة y"، والتوابع العكسية، فإنه الوقت المناسب للاستثمار في الآلة الحاسبة العلمية التي تمتلك هذه الميزات. تحوي بعض نظم تشغيل الكمبيوتر على برامج مقنعة لآلات حاسبة.

اللوغاريتمات

اللوغاريتم (يدعى في بعض الأحيان *log*) هو رفع ثابت لأس ما للحصول على عدد معين. لنفترض أن العلاقات التالية بين الأعداد الحقيقية a، وx، وy محققة:

$$a^y = x$$

وبالتالي فإن y هو لوغاريتم x بالنسبة للأساس a. وتُكتب العبارة على الشكل:

$$y = \log_a x$$

إن أسس اللوغاريتمات الأكثر استخداماً هي 10 وe حيث إنّ e عدد غير دوري وغير منتهٍ ويساوي تقريباً 2.71828.

اللوغاريتمات العامة

تُدعى اللوغاريتمات ذات الأساس 10 أيضاً *باللوغاريتمات العامة*. تُكتب اللوغاريتمات العامة في المعادلات على شكل *log* بدون رمز سفلي أو دليلي - منخفض. مثلاً:

$$\log 10 = 1.000$$

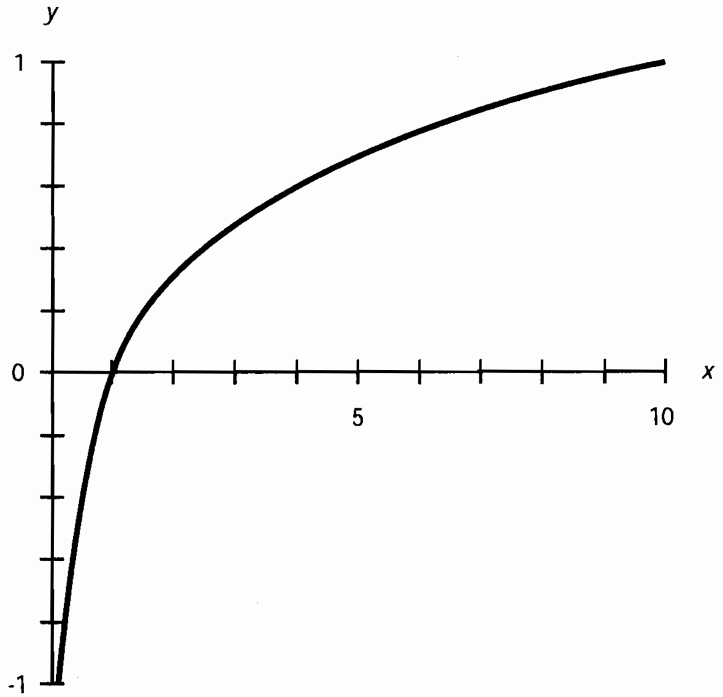
يوضح الشكل (5-1) منحنى تقريبي للتابع $y = \log x$ في الإحداثيات الخطية، ويوضح الشكل (5-2) المنحنى التقريبي للتابع في الإحداثيات نصف اللوغاريتمية. يقتصر منطلق التابع على الأعداد الحقيقية الموجبة. بينما يضم مُستقر التابع مجموعة الأعداد الحقيقية كاملةً.

اللوغاريتمات الطبيعية

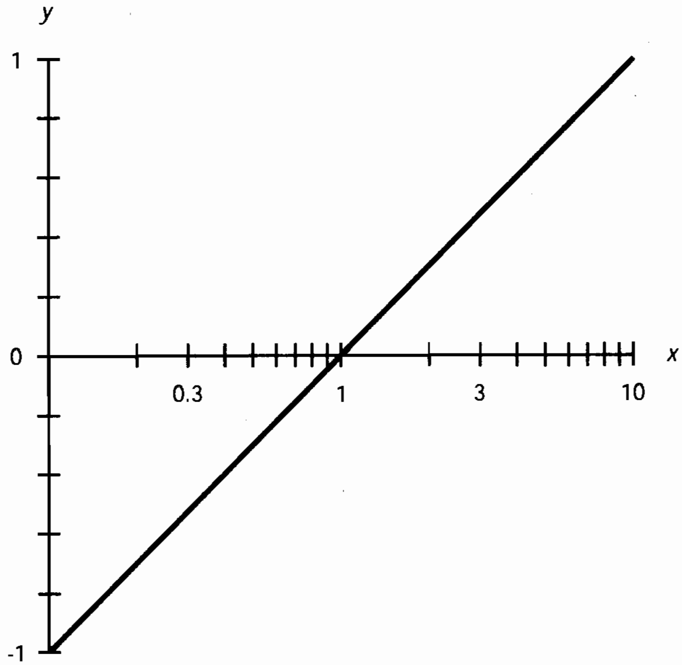
تُدعى اللوغاريتمات ذات الأساس e أيضاً *باللوغاريتمات الطبيعية أو النيبرية*. يُشار إلى تابع اللوغاريتم الطبيعي عادةً في المعادلات بالرمز ln أو log_e. مثلاً:

$$\ln 2.71828 = \log_e 2.71828 \approx 1.00000$$

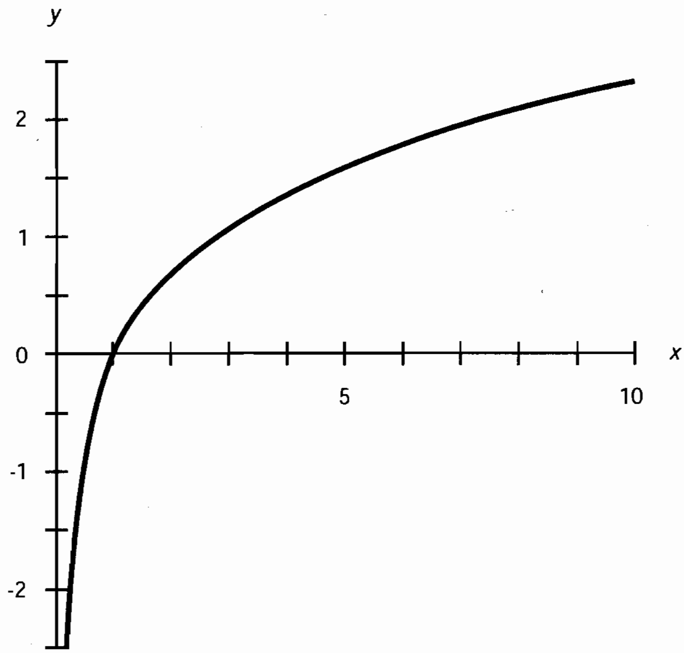
يوضح الشكل (5-3) منحنى تقريبي للتابع $y = \ln x$ في الإحداثيات الخطية. ويوضح الشكل (5-4) منحنى التابع في الإحداثيات نصف اللوغاريتمية. يقتصر منطلق التابع على الأعداد الحقيقية الموجبة، ويضم المستقر مجموعة الأعداد الحقيقية كاملةً.



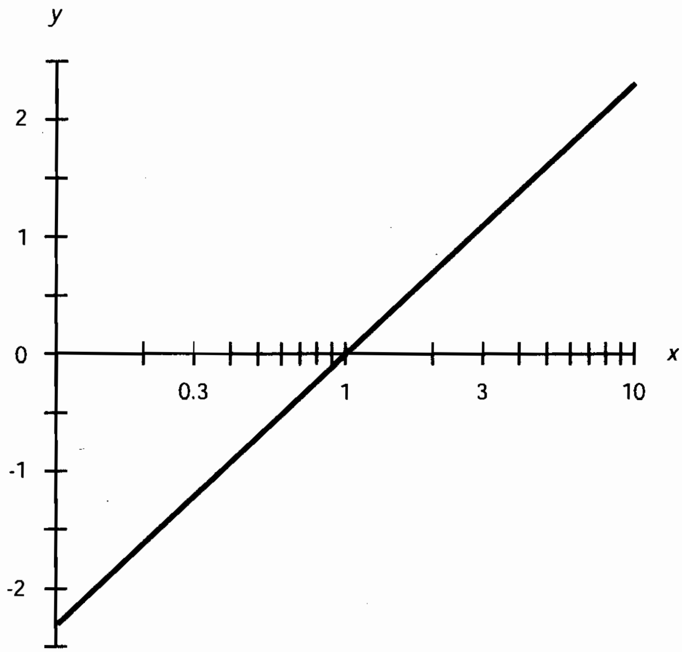
الشكل (5-1): المنحنى التقريبي للتابع اللوغاريتمي العام في الإحداثيات الخطية.



الشكل (5-2): المنحنى التقريبي للتابع اللوغاريتمي العام في الإحداثيات نصف اللوغاريتمية.



الشكل (5-3): المنحنى التقريبي للتابع اللوغاريتمي الطبيعي في الإحداثيات الخطية.



الشكل (5-4): المنحنى التقريبي للتابع اللوغاريتمي الطبيعي في الإحداثيات نصف اللوغاريتمية.

اللوغاريتمات العامة بدلالة اللوغاريتمات الطبيعية

لنفتـــرض أن x عدد حقيقي موجب. يمكن التعبير عن اللوغاريتم العام للمتحول x بدلالة اللوغاريتم الطبيعي للمتحول x والعدد 10:

$$\log x = \ln x/\ln 10 \approx 0.434 \ln x$$

اللوغاريتم الطبيعي بدلالة اللوغاريتم العام

لنفترض أن x عدد حقيقي موجب. يمكن التعبير عن اللوغاريتم الطبيعي للمتحول x بدلالة اللوغاريتم العام للمتحول x والعدد e:

$$\ln x = \log x/\log e \approx 2.303 \log x$$

لوغاريتم الضرب

لنفتـــرض أن x وy عـــددان حقيقيان موجبان. اللوغاريتم الطبيعي أو العام لحاصل ضرب العددين يساوي إلى مجموع لوغاريتمات كل من الأعداد:

$$\log xy = \log x + \log y$$

$$\ln xy = \ln x + \ln y$$

لوغاريتم نسبة (كسر)

لـــيكن x وy عددين حقيقيين موجبين. اللوغاريتم الطبيعي أو العام لنسبة (كسر) يساوي إلى الفرق بين لوغاريتمات كل من الأعداد:

$$\log(x/y) = \log x - \log y$$

$$\ln(x/y) = \ln x - \ln y$$

لوغاريتم قوة

لنفتـــرض أن x عدد حقيقي موجب؛ وليكن y أي عدد حقيقي. يمكن اختصار اللوغاريتم العام أو الطبيعي للمتحول x مرفوعاً إلى القوة y إلى ضرب كما يلي:

$$\log x^y = y \log x$$

$$ln\, x^y = y\, ln\, x$$

لوغاريتم المقلوب

لنفترض أن x عدد حقيقي موجب. اللوغاريتم الطبيعي أو العام لمقلوب المتحول x (المعاكس بالنسبة لعملية الضرب) يساوي إلى المعاكس بالنسبة لعملية الجمع (المعاكس الجمعي) للوغاريتم x

$$\log(1/x) = -\log x$$

$$\ln(1/x) = -\ln x$$

لوغاريتم الجذر

لنفتـــرض أن x عـــدد حقيقـــي موجب وy أي عدد حقيقي باستثناء الصفر. يمكن إيجاد اللوغاريتم الطبيعي أو العادي للجذر y للمتحول x (يشار إليه أيضاً x مرفوعاً للقوة $1/y$) باستخدام المعادلات التالية:

$$\log(x^{1/y}) = (\log x)/y$$

$$\ln(x^{1/y}) = (\ln x)/y$$

اللوغاريتم العام لقوة العدد 10

اللوغاريتم العام للعدد 10 مرفوعاً لقوة بأي عدد حقيقي يساوي دائماً ذلك العدد الحقيقي:

$$\log(10^x) = x$$

اللوغاريتم الطبيعي لقوة العدد e

اللوغاريتم الطبيعي للعدد e مرفوعاً لقوة بأي عدد حقيقي يساوي دائماً ذلك العدد الحقيقي:

$$ln\,(e^x) = x$$

التوابع الأسية

العـــدد *الأسي* هو عدد ينتج عن رفع ثابت إلى قوة ما. لنفترض أن العلاقة التالية بين الأعداد الحقيقية الثلاثة a، وx، وy محققة:

$$a^x = y$$

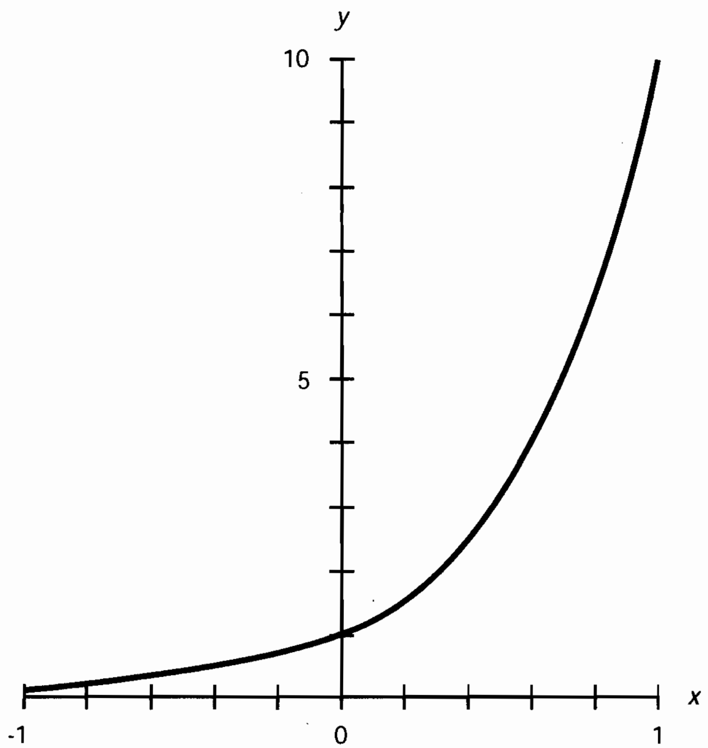
وبالـــتالي فـــإن y يساوي إلى الأساس a أس x. إن أسس التوابع الأسية الأكثر شيوعاً هي $a = 10$ و$a = e \approx 2.71828$.

التوابع الأسية العامة

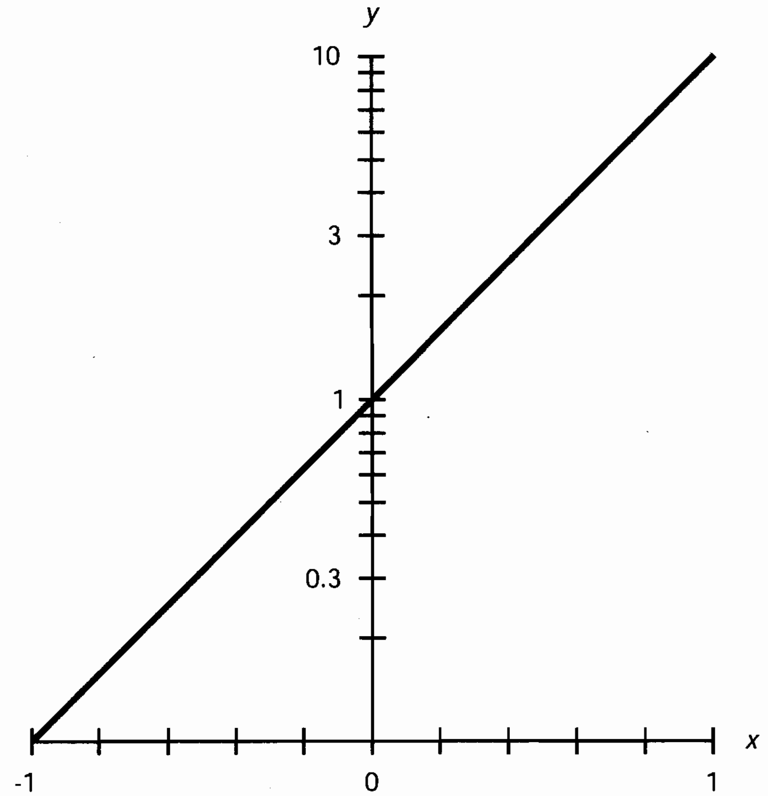
تُدعى التوابع الأسية ذات الأساس 10 أيضاً *بالتوابع الأسية العامة*. مثلاً:

$$10^{-3.000} = 0.001$$

يوضح الشكل (5–5) المنحنى التقريبي للتابع $y = 10^x$ في الإحداثيات الخطية. ويوضح الشكل (5–6) المنحنى نفسه في الإحداثيات نصف اللوغاريتمية. يضم منطلق التابع مجموعة الأعداد الحقيقية كاملة. يقتصر مستقر التابع على الأعداد الحقيقية الموجبة.



الشكل (5–5): المنحنى التقريبي للتابع الأسي العام في الإحداثيات الخطية.



الشكل (5–6): المنحنى التقريبي العام للتابع الأسي في الإحداثيات نصف اللوغاريتمية.

التوابع الأسية الطبيعية

تُدعى التوابع الأسية ذات الأساس e أيضاً *بالتوابع الأسية الطبيعية*. مثلاً:

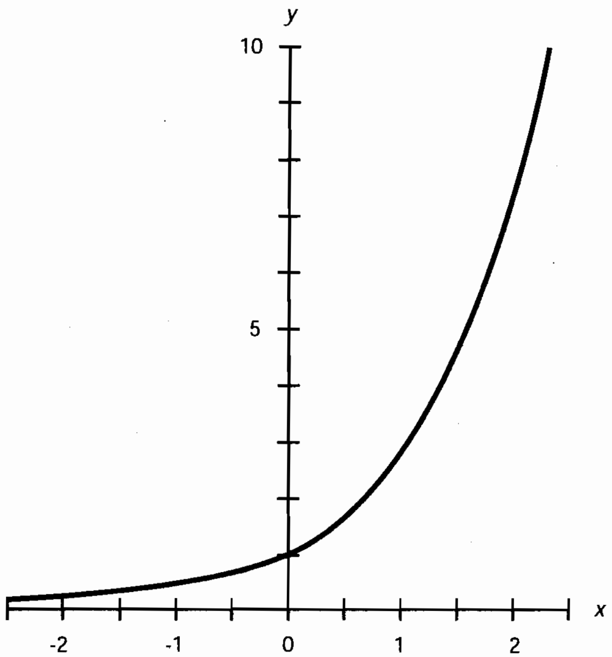
$$e^{-3.000} \approx 2.71828^{-3.000} \approx 0.04979$$

يوضح الشكل (5–7) المنحنى التقريبي للتابع $y = e^x$ في الإحداثيات الخطية. ويوضح الشكل (5–8) المنحنى نفسه في الإحداثيات نصف اللوغاريتمية. يضم منطلق التابع مجموعة الأعداد الحقيقية كاملة. يقتصر مستقر التابع على الأعداد الحقيقية الموجبة.

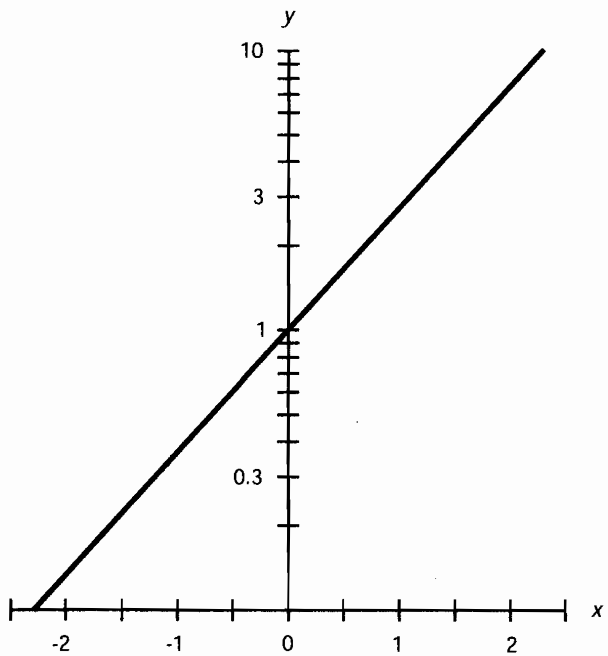
مقلوب التوابع الأسية العامة

ليكن x عدداً حقيقياً موجباً. إنّ مقلوب التابع الأسي العام للمتحول x يساوي إلى المعاكس بالنسبة لعملية الجمع (المعاكس الجمعي) للتابع الأسي العام للمتحول x:

$$1/(10^x) = 10^{-x}$$



الشكل (5-7): المنحنى التقريبي للتابع الأسي الطبيعي في الإحداثيات الخطية.



الشكل (5-8): المنحنى التقريبي للتابع الأسي الطبيعي في الإحداثيات نصف اللوغاريتمية.

مقلوب التابع الأسي الطبيعي

ليكن x عدداً حقيقياً موجباً. إنّ مقلوب التابع الأسي الطبيعي للمتحول x يساوي إلى المعاكس بالنسبة لعملية الجمع (المعاكس الجمعي) للتابع الأسي الطبيعي للمتحول x:

$$1/(e^x) = e^{-x}$$

ضرب التوابع الأسية

ليكن x وy عددين حقيقيين. إن التابع الأسي للمتحول x مضروباً في التابع الأسي للمتحول y يساوي التابع الأسي لمجموع كل من x وy. إن كلاً من المعادلتين التاليتين صحيحة:

$$(10^x)(10^y) = 10^{(x+y)}$$

$$(e^x)(e^y) = e^{(x+y)}$$

نسبة التوابع الأسية

ليكن x وy عددين حقيقيين موجبين. إن التابع الأسي لحاصل قسمة التابع الأسي للمتحول x على التابع الأسي للمتحول y يساوي إلى التابع الأسي للفرق بين x وy. إن كلاً من المعادلتين التاليتين صحيحة:

$$10^x/10^y = 10^{(x-y)}$$

$$e^x/e^y = e^{(x-y)}$$

التابع الأسي لتابع أسي عام

لنفترض أن x وy عددان حقيقيان موجبان. القوة y للمقدار 10^x تساوي إلى التابع الأسي العام لحاصل ضرب $x\,y$:

$$(10^x)^y = 10^{(xy)}$$

تنطبق الحالة نفسها على التابع الأسي ذي الأساس e. القوة y للمقدار e^x تساوي إلى التابع الأسي الطبيعي لحاصل الضرب xy:

$$(e^x)^y = e^{(xy)}$$

ضرب التوابع الأسية العامة والتوابع الأسية الطبيعية

ليكن x عدداً حقيقياً. إن حاصل ضرب التوابع الأسية العامة والتوابع الأسية الطبيعية للمتحول x يساوي إلى التابع الأسي للمتحول x بأساس $10\,e$. أي يمكن نقول:

$$(10^x)(e^x) = (10e)^x \approx (27.1828)^x$$

لنفترض الآن أن x عدد حقيقي لا يساوي الصفر. إن حاصل ضرب التوابع الأسية العامة والتوابع

الأسية الطبيعية للمتحول $1/x$ يساوي إلى التابع الأسي للمتحول $1/x$ بأساس $10\,e$:

$$(10^{1/x})/(e^{1/x}) = (10e)^{1/x} \approx (27.1828)^{1/x}$$

حاصل قسمة التابع الأسي العام على التابع الأسي الطبيعي

ليكن x عدداً حقيقياً. إن حاصل قسمة التابع الأسي العام للمتحول x على التابع الأسي الطبيعي للمتحول x يساوي إلى التابع الأسي للمتحول x بأساس $10/e$. أي يمكننا أن نقول:

$$10^x/e^x = (10/e)^x \approx (3.6788)^x$$

لنفترض الآن أن x عدد حقيقي لا يساوي الصفر. إن حاصل قسمة التابع الأسي العام $1/x$ على التابع الأسي الطبيعي للمتحول $1/x$ يساوي إلى التابع الأسي للمتحول $1/x$ بأساس $10/e$:

$$(10^{1/x})/(e^{1/x}) = (10/e)^{1/x} \approx (3.6788)^{1/x}$$

حاصل قسمة التابع الأسي الطبيعي على التابع الأسي العام

ليكن x عدداً حقيقياً. إن حاصل قسمة التابع الأسي الطبيعي للمتحول x على التابع الأسي العام للمتحول x يساوي إلى التابع الأسي للمتحول x بأساس $e/10$. أي يمكننا أن نقول:

$$e^x/10^x = (e/10)^x \approx (0.271828)^x$$

لنفترض الآن أن x هو عدد طبيعي لا يساوي الصفر. إن حاصل قسمة التابع الأسي الطبيعي $1/x$ على التابع الأسي العام ل $1/x$ يساوي إلى التابع الأسي ل $1/x$ بأساس $e/10$:

التابع الأسي العام لحاصل قسمة

ليكن x وy عددين حقيقيين، مع اشتراط أن $y \neq 0$. إن التابع الأسي لحاصل قسمة المتحول x على المتحول y يساوي إلى التابع الأسي العام للمتحول $1/y$ بأساس 10^x:

$$10^{x/y} = (10^x)^{1/y}$$

الوضع المشابه بالنسبة للأساس e محقق. التابع الأسي الطبيعي لحاصل قسمة المتحول x على المتحول y يساوي إلى التابع الأسي الطبيعي للمتحول $1/y$ بأساس e^x.

$$e^{x/y} = (e^x)^{1/y}$$

التوابع المثلثية

يوجد ستة *توابع مثلثية* أساسية. تُطبق على الزوايا للحصول على أعداد حقيقية وتعرف *بتوابع جيب الزاوية، وجيب التمام، وظل الزاوية، وقاطع الزاوية، وقاطع التمام، وظل التمام*. يجري اختصارها في المعادلات والصيغ إلى sin، وcos، وtan، وcsc، وsec، وcot على التوالي.

حتى الآن، أشرنا إلى الزوايا باستخدام أحرف إنكليزية صغيرة مائلة واقعة بالقرب من نهاية الأحرف الأبجدية، مثلاً، w، وx، وy، وz. ولكن تُستخدم الأحرف اللاتينية دائماً تقريباً في علم المثلثات، خاصة θ (حرف صغير مائل يلفظ تيتا) وΦ (حرف صغير مائل يلفظ فاي أو في). سنقوم باتباع هذا الاصطلاح هنا. يجب عليك أن تعتاد عليها بحيث تتعلم كيفية لفظ الأسماء والرموز عند رؤيتها. سيساعدك ذلك على تجنب الارتباك عند استخدامها في الفيزياء. إن حفظ كيفية لفظها أمر هام جداً لأنه قد يسهل عليك العمل بالصيغ التي تحوي رموزاً كهذه.

التوابع الدائرية الأساسية

لنأخذ بالاعتبار دائرة في الإحداثيات المتعامدة تحقق المعادلة التالية:

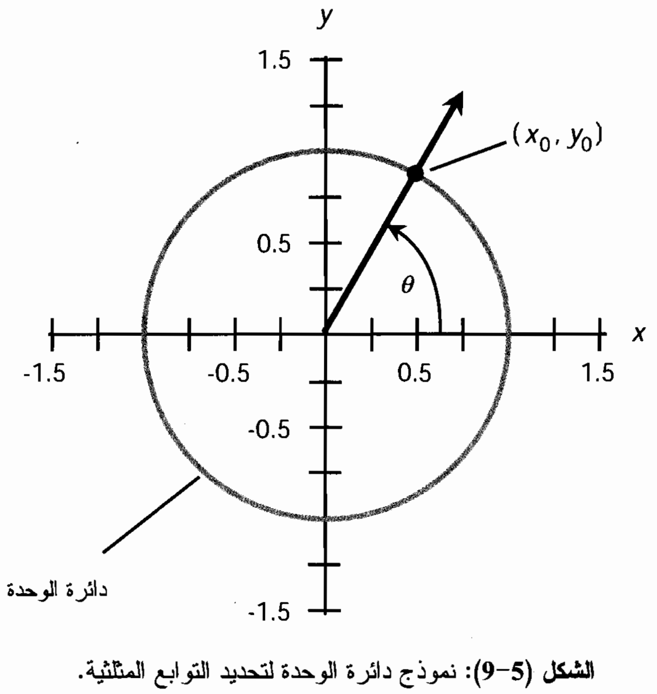
$$x^2 + y^2 = 1$$

تُدعى هذه الدائرة بدائرة الوحدة لأن نصف قطرها وحدة واحدة، ومركزها مبدأ الإحداثيات $(0, 0)$، كما هو موضح في الشكل (5-9). لتكن θ زاوية رأسها يقع على المبدأ ومقاسة بعكس عقارب الساعة بدءاً من محور الفواصل (المحور x). لنفترض أن هذه الزاوية تقابل الشعاع الذي يتقاطع مع دائرة الوحدة بنقطة ما $P = (x_0, y_0)$. وبالتالي

$$y_0 = \sin \theta$$

$$x_0 = \cos \theta$$

$$y_0/x_0 = \tan \theta$$



الشكل (5-9): نموذج دائرة الوحدة لتحديد التوابع المثلثية.

التوابع المثلثية الثانوية

جـــرى اشتقاق ثلاثة توابع مثلثية إضافية من التوابع المعرفة سابقاً: وهي تابع *قاطع تمام الزاوية*، وتابع *قاطع الزاوية*، وتابع *ظل تمام الزاوية*. يجري اختصارها في المعادلات والصيغ إلى $\csc\ \theta$، و$\sec\ \theta$، و$\cot\ \theta$، إنها معرفة على الشكل التالي:

$$\csc \theta = 1/(\sin \theta) = 1/y_0$$

$$\sec \theta = 1/(\cos \theta) = 1/x_0$$

$$\cot \theta = 1/(\tan \theta) = x_0/y_0$$

نموذج المثلث القائم

لـــنأخذ بالاعتـــبار المثلث القائم ΔPQR بحيث تكون الزاوية PQR $\angle$ زاوية قائمة. ليكن d طول القطعـــة المـــستقيمة RQ، وe طول القطعة المستقيمة QP، وf طول القطعة المستقيمة RP، وذلك كما هو موضح في الشكل (5-10). لتكن θ الزاوية المحصورة بين القطع المستقيمة RQ وRP. يمكن تعريف التوابع المثلثية الستة على شكل نِسَب الأضلاع بأطوال كما يلي:

$$\sin \theta = e/f$$

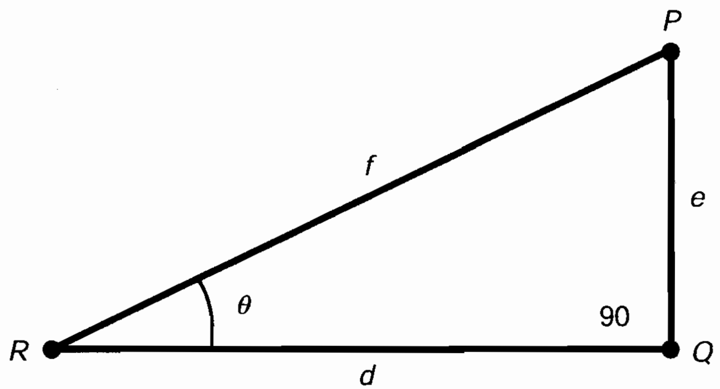
$$\cos \theta = d/f$$

$$\tan \theta = e/d$$

$$\csc \theta = f/e$$

$$\sec \theta = f/d$$

$$\cot \theta = d/e$$



الشكل (5-10): نموذج المثلث القائم لتعريف التوابع المثلثية.

المثلثية Identities

تـــصف الفقـــرات اللاحقة identities *المثلثية* للتوابع الدائرية. تنطبق هذه الصيغ على الزوايا θ وΦ ضمن المجال القياسي إذا لم يُحدد خلاف ذلك كما يلي:

$0 \leq \theta < 2\pi$ (بالراديان)

$0 \leq \theta < 360$ (بالدرجات)

$0 \leq \Phi < 2\pi$ (بالراديان)

$0 \leq \Phi < 360$ (بالدرجات)

يجـــري عادةً تحويل الزوايا الواقعة خارج المجال القياسي إلى زوايا تقع قيمها ضمن المجال القياسي من خـــلال إضـــافة أو طرح مضاعفات 2π راديان (360°). قد تسمع من حين إلى آخر بالقياسات السالبة، المقاســـه باتجاه عقارب الساعة بدلاً من قياسها بعكس اتجاه عقارب الساعة، ولكن يمكن تحويل ذلك دائماً إلى زاويـــة بقياس موجب بحيث تكون قيمتها 0 على الأقل ولكن أقل تماماً من 360°. ينطبق الأمر نفسه علـــى "الـــزوايا" الأكـــبر من 360°. سيستخدم الفيزيائيون في بعض الأحيان عبارات زاويّة غريبة (مثلاً، سيتحدثون عن الدوران العكسي أو عن عدة دورات معكوسة)، ولكن من الأفضل عادةً تخفيض الزوايا إلى قيم تقع ضمن المجال القياسي. تُعالِج بعض هذه الصيغ الزوايا السالبة، ولكن يكون الهدف في هذه الحالات هو السماح لك بتحديد القيمة المكافئة للتابع المثلثي لزاوية ما ضمن المجال القياسي.

نظرية فيثاغورث لتوابع الجيب وجيب التمام

مجمـــوع مـــربعات الجـــيب وجـــيب الـــتمام للزاوية يساوي دائماً 1. وبالتالي تنص الصيغة التالية على:

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$$

يشير $sin^2 \theta$ إلى مربع جيب الزاوية (وليس إلى جيب مربع الزاوية).أي يمكننا أن نقول:

$$\sin^2 \theta = (\sin \theta)^2$$

ينطبق الأمر نفسه على توابع جيب التمام، وظل الزاوية، وقاطع التمام، وظل التمام، وجميع العبارات المشابهة الأخرى التي ستراها في ما تبقى من هذا الفصل وفي الفيزياء.

نظرية فيثاغورث لتوابع القاطع والظل

الفرق بين مربعات توابع القاطع والظل الزاوية يساوي دائماً 1 أو -1. تُطبَّق الصيغ التالية على جميع الزوايا باستثناء راديان $\theta = \pi/2$ أو (90°)، وراديان $\theta = 3\pi/2$ أو (270°):

$$\sec^2 \theta - \tan^2 \theta = 1$$

$$\tan^2 \theta - \sec^2 \theta = -1$$

جيب الزاوية السالبة

إن جـــيب معـــاكس الـــزاوية (زاوية مقاسة بالاتجاه المعاكس للاتجاه الطبيعي) يساوي إلى معاكس (المعاكس بالنسبة لعملية الجمع (الجمعي)) جيب الزاوية، وبالتالي تنص الصيغة التالية على:

$$\sin -\theta = -\sin \theta$$

جيب تمام الزاوية السالبة

إن جيب تمام معاكس الزاوية يساوي إلى جيب تمام الزاوية. وبالتالي تنص الصيغة التالية على:

$$\cos -\theta = \cos \theta$$

ظل الزاوية السالبة

إن ظـــل معاكس الزاوية يساوي إلى معاكس (المعاكس بالنسبة لعملية الجمع (الجمعي)) ظل الزاوية. تُطبَّق الصيغ التالية على كل الزوايا باستثناء راديان $\theta = \pi/2$ أو (90°)، وراديان $\theta = 3\pi/2$ أو (270°):

$$\tan -\theta = -\tan \theta$$

قاطع تمام الزاوية السالبة

إن قاطع تمام معاكس الزاوية يساوي إلى معاكس (المعاكس بالنسبة لعملية الجمع (المعاكس الجمعي)) قاطع تمام الزاوية. تُطبَّق الصيغة التالية على جميع الزوايا باستثناء راديان $0 = \theta$ أو (0°)، وراديان $\pi = \theta$ أو (180°):

$$\csc -\theta = -\csc \theta$$

قاطع الزاوية السالبة

إن قاطـــع معـــاكس الزاوية يساوي إلى قاطع الزاوية. تُطبَّق الصيغة التالية على جميع الزوايا باستثناء راديان $\theta = \pi/2$ أو (90°)، وراديان $\theta = 3\pi/2$ أو (180°):

$$\sec -\theta = \sec \theta$$

ظل تمام الزاوية السالبة

إن ظل تمام معاكس الزاوية يساوي إلى معاكس (المعاكس بالنسبة لعملية الجمع (المعاكس الجمعي)) لظل تمام الزاوية. تُطبَّق الصيغة التالية على جميع الزوايا باستثناء راديان $0 = \theta$ أو (180°) وراديان $\pi = \theta$ أو (180°):

$$\cot -\theta = -\cot \theta$$

جيب ضعفي الزاوية

إن جـــيب ضـــعفي أي زاوية يساوي إلى ضعفي جيب الزاوية الأصلية مضروباً في جيب تمام الزاوية الأصلية:

$$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$$

جيب تمام ضعفي الزاوية

يمكن إيجاد جيب تمام ضعفي أي زاوية باستخدام أي من الصيغتين التاليتين:

$$\cos 2\theta = 1-(2 \sin^2 \theta)$$

$$\cos 2\theta = (2 \cos^2 \theta) -1$$

جيب نصف الزاوية

يمكـــن إيجاد جيب نصف أي زاوية باستخدام أي من الصيغ التالية عندما تكون راديان $0 \le \theta < \pi$ ($0 \le \theta < 180^\circ$):

$$\sin (\theta/2) = [(1 - \cos \theta)/2]^{1/2}$$

وعندما تكون راديان $\pi \le \theta < 2\pi$ ($180 \le \theta < 360^\circ$) تصبح الصيغة:

$$\sin (\theta/2) = - [(1 - (\cos \theta)/2]^{½}$$

جيب تمام نصف الزاوية

يمكن إيجاد جيب تمام نصف زاوية باستخدام أي من الصيغ التالية عندما تكون راديان $0 \le \theta < \pi/2$ ($0 \le \theta < 90^\circ$) أو عندما تكون راديان $3\pi/2 \le \theta < 2\pi$ ($270 \le \theta < 360^\circ$):

$$\cos (\theta/2) = [(1 + \cos \theta)/2]^{½}$$

وعندما تكون راديان $\pi/2 \le \theta < 3\pi/ 2$ أو ($90 \le \theta < 270^\circ$) تصبح الصيغة

$$\cos (\theta/2) = - [(1 + \cos \theta)/2]^{½}$$

جيب المجموع الزاوي

يمكن إيجاد جيب مجموع زاويتين θ وΦ باستخدام الصيغة التالية:

$$\sin (\theta + \Phi) = (\sin \theta) (\cos \Phi) + (\cos \theta) (\sin \Phi)$$

جيب تمام المجموع الزاوي

يمكن إيجاد جيب تمام مجموع زاويتين θ وΦ باستخدام الصيغة التالية:

$$\cos(\theta + \Phi) = (\cos\theta)(\cos\Phi) - (\sin\theta)(\sin\Phi)$$

جيب فرق زاويتين

يمكن إيجاد جيب فرق زاويتين θ وΦ باستخدام الصيغة التالية:

$$\sin(\theta - \Phi) = (\sin\theta)(\cos\Phi) - (\cos\theta)(\sin\Phi)$$

جيب تمام فرق زاويتين

يمكن إيجاد جيب تمام فرق زاويتين θ وΦ باستخدام الصيغة التالية:

$$\cos(\theta - \Phi) = (\cos\theta)(\cos\Phi) + (\sin\theta)(\sin\Phi)$$

امتحان موجز

عـــد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت على ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. يشمل مستقر التابع اللوغاريتمي العام مجموعة
   (a) الأعداد الحقيقة كاملةً
   (b) الأعداد الحقيقة الموجبة كاملةً
   (c) الأعداد الحقيقة غير السالبة كاملةً
   (d) الأعداد الحقيقة كاملة باستثناء الصفر
2. يـــبلغ القطر الزاوي لقمر صناعي كروي 2.00 درجة قوسية من مسافة 503 أمتار (أي يشكل قرصه زاويـــة ظاهرة). ما هو نصف القطر الفعلي للقمر الصناعي؟ افترض أن المسافة مقاسة من مركز القمر الصناعي.
   (a) 8.78 متراً
   (b) 17.6 أمتار
   (c) 10.6 أمتار
   (d) 2.79 متراً
3. مـــا هو $\sin 45°$؟ لا تستخدم الآلة الحاسبة لتحديد الجواب. استخدم نظرية فيثاغورث (كما عرّفناها في الفصل الرابع) والجبر البسيط.
   (a) $2^{1/2}$
   (b) $2^{-1/2}$

(c) 1

(d) لا يمكن تحديد هذه القيمة من هذه المعلومات.

4. اللوغاريتم الطبيعي للعدد 5.670−، مقرباً الجواب إلى أربعة أرقام هامة، يساوي

(a) 1.735

(b) −1.735

(c) 0.7536

(d) لا شيء؛ القيمة غير معرفة.

5. مـــا هـــي قيمة ناتج القسمة $(10^{(4.553)}/10^{(3.553)})$؟ تمّت إضافة الأقواس لجعل العبارة ذات معنى واضح تماماً.

(a) 10

(b) 1

(c) 4.553

(d) 3.553

6. لنفترض أنك أُعطيت المعادلة $e^x = -5$ وطُلب منك حلها. ماذا يمكنك أن تقول عن قيمة x؟

(a) عدد حقيقي كبير موجب

(b) عدد يقع بين 0 و 1

(c) عدد حقيقي كبير السالبية

(d) ليس عدداً حقيقياً

7. ما هي قيمة $\ln e$ مُعبِّراً عنها بثلاثة أرقام هامة؟ استخدم الآلة الحاسبة إذا احتجت لها.

(a) 0.434

(b) 2.718

(c) 1.000

(d) لا يمكن حسابها دون معرفة المزيد من المعلومات.

8. لنفترض أن جيب تمام زاوية صغيرة يساوي 0.950. ما هو جيب تمام معاكس تلك الزاوية – أي جيب تمام الزاوية نفسها مقاسة باتجاه عقارب الساعة بدلاً من قياسها بعكس اتجاه عقارب الساعة؟

(a) 0.950

(b) −0.950

(c) 0.050

(d) −0.050

9. لـــيكن طـــول اليوم على الأرض 24 ساعة (مقاساً بالنسبة للشمس)، كم درجة تدور الأرض في دقيقة واحدة من الزمن؟

(a) 1/60

(b) 15

(c) 1/3,600

(d) 0.25

10. لنفترض وجود نقطتين على خط الاستواء يفصل بينهما قوس طوله ثانية (أي 1/3,600 درجة زاويّة). إذا أُعطي محيط الأرض في خط الاستواء 4.00×10^7 متر، فما هو البعد الفاصل بين النقطتين؟

(a) 1.11×10^4 متر

(b) 463 متراً

(c) 30.9 أمتار

(d) لا يمكن حسابه من خلال هذه المعلومات.

اختبار الباب صفر

لا تعــد إلى الــنص عند تقديم هذا الاختبار. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت على 37 سؤالاً بشكل صــحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب. يُفضَّل أن يكون لديك صديق يقوم بتدقيق الأجوبة عــند تقديمك للاختبار للمرة الأولى وبالتالي لن تتذكر الأجوبة، وبالتالي يمكنك تقديم الامتحان مرة أخرى إذا رغبت.

1. يدعى الثابت بعدد حقيقي والذي لا يُعبَّر عنه بوحدات بالثابت

(a) الإقليدي.

(b) الديكارتي.

(c) عديم البعد.

(d) غير الدوري وغير المنتهي.

(e) الدوري.

2. إذا تحدث شخص ما عن *جيغامتر* في حديث عام، فكم كيلومتراً يُفترض أن تكون هذه القيمة؟

(a) 1,000.

(b) 10,000.

(c) 100,000.

(d) مليون.

(e) بليون.

3. في الإحداثيات اللوغاريتمية – اللوغاريتمية،

(a) يكون أحد المحاور خطياً، ويُحدد الآخر وفقاً لزاوية.

(b) يكون المحوران لوغاريتميين.

(c) يمكن إظهار جميع الثنائيات الحقيقية الممكنة في منطقة محدودة.

(d) يمكن تحديد القيم الثلاث وفقاً للزوايا.

(e) النقاط محددة وفقاً لصعود قائم وميل زاوي.

4. لنأخذ بالاعتبار السلسلة العددية: 7.899797، 7.89979، 7.8997، 7.899، ... حيث جرى تعديل كل عدد في السلسلة للحصول على العدد اللاحق. هذه الإجرائية هي مثال عن

(a) التقريب بالحذف.

(b) ضرب الأشعة.

(c) التقريب بالتدوير.

(d) استخراج الجذور.

(e) التدوين العلمي.

5. العبارة 3_x (تُقرأ "ثلاثة منخفض x") هي طريقة أخرى لكتابة

(a) 3 مرفوعاً للقوة x.

(b) 3 مضروباً في x.

(c) 3 مقسوماً على x.

(d) الجذر x للعدد 3.

(e) لا شيء؛ إنها عبارة غير قياسية.

6. أي العبارات التالية صحيحة؟

(a) يمكن تحديد رباعي الأضلاع بشكل وحيد وفقاً لأطوال أضلاعه الأربعة.

(b) تُنصِّف أقطار متوازي الأضلاع بعضها دائماً.

(c) أي أربع نقاط تقع دائماً في مستوى واحد.

(d) إذا كان قياس إحدى الزوايا الداخلية للمثلث 90°، فإن قياس ما تبقى من الزوايا في ذلك المثلث يساوي 90°.

(e) جميع العبارات الواردة أعلاه صحيحة.

7. إذا رأيت الحرف الصغير المائل c في معادلة أو صيغة تصف الخصائص الفيزيائية للنظام، فمن المحتمل أن يُمثِّل

(a) أساس التابع الأسي الذي يساوي تقريباً 2.71828.

(b) نسبة قطر الدائرة إلى نصف قطرها.

(c) الجذر التربيعي للعدد 1-.

(d) سرعة الضوء في الفضاء الحر.

(e) الزاوية 90° في المثلث القائم.

8. لنفتــرض أن هــناك طائرة تطير في مسار مستوى فوق مستوى مسطح. قمت في لحظة معينة بقياس الزاوية x التي تظهر فيها الطائرة فوق الأفق. في اللحظة نفسها يراك الطيار ويقيس الزاوية y التي تظهر تحت الأفق. أي العبارات التالية صحيحة؟

(a) $x < y$.

(b) $x = y$.

(c) $x > y$.

(d) تعتمد العلاقة بين x وy على زاوية الطول الجغرافي.

(e) تعتمد العلاقة بين x وy على سرعة الطائرة.

9. لنفتــرض أنك أُعطيت أن قطر الشمس يساوي 1.4×10^6 كيلو متر، وقمت بقياس قطره الزاوي في السماء فوجدته 0.50°. ما هو البعد التقريبي للشمس، اعتماداً على هذه المعلومات، مقرباً الجواب إلى رقمين هامين؟

(a) 1.6×10^8 كيلومتر.

(b) 6.2×10^8 كيلومتر.

(c) 1.6×10^7 كيلومتر.

(d) 6.2×10^7 كيلومتر.

(e) 6.2×10^6 كيلومتر.

10. مـــا هو قطر كرة حجمها 100 متر مكعب؟ (إن صيغة حجم الكرة V بالأمتار المكعبة، كتابع لنصف قطرها R بالأمتار، هي $V = 4\pi r^3/3$)

(a) 2.88 متر.

(b) 4.19×10^6 متر.

(c) 5.76 متراً.

(d) 8.28×10^6 متر.

(e) لا يوجد معلومات كافية لتحديد القطر.

11. ما هو الفرق، من وجهة نظر الفيزياء التجريبية، بين 2.0000000×10^5 و2.000×10^5؟

(a) إحدى العبارات لها ثمانية أرقام هامة، والأخرى لها أربعة أرقام هامة.

(b) أربع مراتب.

(c) جزء واحد من 10,000.

(d) تدوير رقم واحد، والآخر تقريبه بحذفه.

(e) لا يوجد أي فرق يُذكر بين العبارتين.

12. عد إلى الشكل - اختبار (0 - 1) ما هو مُنطلَق هذا التابع؟

(a) كامل الأعداد الحقيقية بين 0 و1 ومن ضمنها 0 و1.

(b) كامل الأعداد الحقيقية الأكبر من 0 ولكن أصغر أو تساوي 1.

(c) كامل الأعداد الحقيقية الأكبر أو تساوي 0 ولكن أصغر من 1.

(d) كامل الأعداد الحقيقية بين 0 و1 بدون تضمين 0 و1.

(e) الأعداد الحقيقة كاملة.

13. عد مرة أخرى إلى الشكل - اختبار (0-1). ما هو مُستقر هذا التابع

(a) كامل الأعداد الحقيقية بين 0 و1 ومن ضمنها 0 و1.

(b) كامل الأعداد الحقيقية الأكبر من 0 ولكن أصغر أو تساوي 1.

(c) كامل الأعداد الحقيقية الأكبر أو تساوي 0 ولكن أصغر من 1.

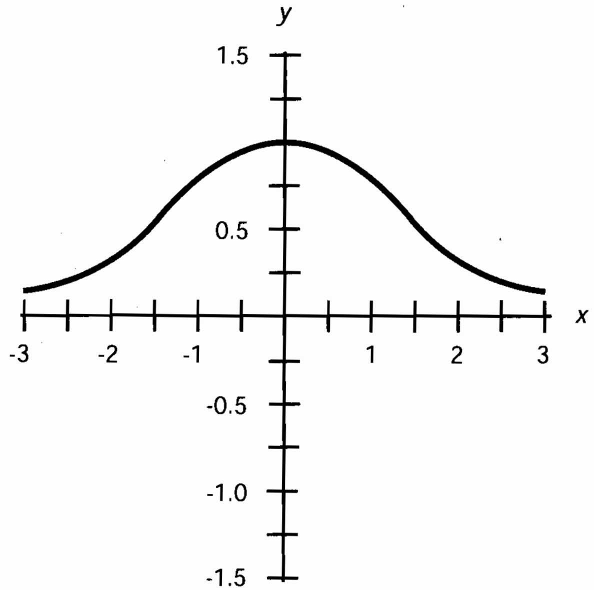
(d) كامل الأعداد الحقيقية بين 0 و1 بدون تضمين 0 و1.

(e) الأعداد الحقيقية كاملة.

14. لنفتـــرض أن ســـيارة تسير بسرعة ثابتة على طريق مستقيم. وبالتالي فإن المسافة المقطوعة خلال فترة زمنية محددة تساوي إلى

(a) السرعة مضروبةً بالزمن المنقضي.

(b) السرعة مقسومة على الزمن المنقضي.



الشكل - اختبار (0-1): مثال توضيحي للأسئلة 12 و13 من اختبار الباب صفر.

(c) الزمن المنقضي مقسوماً على السرعة.

(d) مجموع السرعة والزمن المنقضي.

(e) الفرق بين السرعة والزمن المنقضي.

15. يُدعى نظام الإحداثيات ثنائي الأبعاد الذي يجري فيه تمثيل النقاط اعتماداً على زاوية ومسافة قطرية، بشكل مشابه لشاشات عرض الرادار الدائرية بنظام

(a) المستوى الديكارتي.

(b) الإحداثيات نصف اللوغاريتمية.

(c) الإحداثيات الاسطوانية.

(d) الإحداثيات الدائرية.

(e) الإحداثيات القطبية.

16. العبارة 6! تكافئ

(a) اللوغاريتم العام للعدد 6.

(b) اللوغاريتم الطبيعي للعدد 6.

(c) 1/6.

(d) 21.

(e) 720.

17. لنفترض أنك صادفت معادلة عامة بمتحول واحد مكتوبة على الشكل التالي:

$$(x-q)\,(x-r)\,(x-s)\,(x-t)=0$$

يمكن تصنيف هذه المعادلة على أنها معادلة

(a) تربيعية.

(b) تكعيبية.

(c) رباعية.

(d) خماسية.

(e) خطية.

18. لنفترض أنه لديك مجموعة معادلتين بمتحولين. ما هو العدد الأصغري من الحلول المشتركة لهاتين المعادلتين؟

(a) لا يوجد حلول.

(b) حل واحد.

(c) حلان.

(d) ثلاثة حلول.

(e) أربعة حلول.

19. لنفترض أن لديك جداراً من الطوب ارتفاعه 1.5 أمتار واحتجت لبناء معبر مائل إلى قمة الجدار من نقطة ترتفع 3.2 متر عن مستوى سطح الأرض. أي من أطوال الألواح الخشبية التالية كافٍ لإنجاز معبر كهذا دون أن يكون طويلاً بشكل زائد عن اللزوم؟

(a) 4.7 أمتار.

(b) 4.8 أمتار.

(c) 3.6 أمتار.

(d) 1.7 أمتار.

(e) المعلومات المعطاة هنا غير كافية للإجابة عن هذا السؤال.

20. في نظام للإحداثيات الاسطوانية، تُحدد النقطة بالنسبة إلى مبدأ الإحداثيات وإلى شعاع مرجعي وفقاً إلى

(a) الزاوية، ونصف القطر، والارتفاع.

(b) ثلاثة أنصاف أقطار.

(c) ثلاث زوايا.

(d) الارتفاع، والعرض، والعمق.

(e) زوايا الطول والعرض السماوية.

21. ما هو الشكل التربيعي القياسي للمعادلة $(x + 2)(x - 5)$؟

(a) $2x - 3 = 0$.

(b) $x^2 - 10 = 0$.

(c) $x^2 - 3x - 10 = 0$.

(d) $x^2 + 7x + 10 = 0$.

(e) لا يوجد شكل لها لأنها ليست معادلة تربيعية.

22. لنفترض أن مكبساً له شكل اسطواني بمقطع عرضي دائري. إذا كانت مساحة المقطع العرضي الدائري (نهاية الأسطوانة) 10 سنتمترات مربع وطول المكبس نفسه 10 سنتمترات، ما هو الحجم التقريبي للمكبس؟

(a) 10 سنتمترات مربع.

(b) 100 سنتمترات مربع.

(c) 62.8 سنتمترات مكعب.

(d) 100 سنتمترات مكعب.

(e) نحتاج للمزيد من المعلومات لتحديد حجم المكبس.

23. افترض أنك رأيت هذه المعادلة في كتاب فيزياء: $z_0 = 3h + \sin q$. ماذا يعني $\sin q$؟

(a) لوغاريتم الكمية q.

(b) التابع العكسي لجيب الكمية q.

(c) جيب الكمية q.

(d) التابع الأسي للكمية q.

(e) ولا عبارة مما ورد أعلاه.

24. تشكل العبارة $-5.44\text{E} + 04$ طريقة أخرى لكتابة

(a) -5.4404

(b) $544,004$

(c) -5.44×10^{-4}

(d) $-54,400$

25. عند رسم معادلتين بمتحولين، تظهر الحلول التقريبية المشتركة، إذا وُجدت على شكل

(a) نقاط تقاطع المنحنيات مع المحور x.

(b) نقاط تقاطع المنحنيات مع المحور y.

(c) نقاط تقاطع المنحنيات مع بعضها.

(d) نقاط تقاطع المنحنيات مع المبدأ $(0, 0)$.

(e) لا شيء خاص؛ لا تقدم المنحنيات دليلاً للحلول.

26. ما هو حاصل ضرب 5.8995×10^{-8} و1.03×10^{6} ؟ خذ الأرقام الهامة بالحسبان

(a) 6.0764845×10^{-2}

(b) 6.076485×10^{-2}

(c) 6.07648×10^{-2}

(d) 6.076×10^{-2}

(e) 6.08×10^{-2}

27. لنفترض أنك رأيت العبارة التالية في نظرية فيزيائية:

$$\text{sech}^{-1} x = \ln [x^{-1} + (x^{-2} - 1)^{1/2}]$$

ماذا تعني العبارة ln في هذا السياق؟

(a) عدد حقيقي ما مضروب بالعدد 1

(b) اللوغاريتم العام

(c) اللوغاريتم الطبيعي

(d) التابع العكسي لتابع قاطع الزاوية

(e) الجذر التربيعي

28. لنفترض وجود شعاعين **a** و**b**، ممثلين في المستوى الديكارتي كما يلي:

$\mathbf{a} = (3, 5)$

$\mathbf{b} = (-3, -5)$

ما هو مجموع الأشعة في المستوى الديكارتي؟

(a) $\mathbf{a} + \mathbf{b} = -34$.

(b) $\mathbf{a} + \mathbf{b} = (0, 0)$.

(c) $\mathbf{a} + \mathbf{b} = (6, 10)$.

(d) $\mathbf{a} + \mathbf{b} = (-9, -25)$.

(e) إن هذا المجموع غير موجود، لأن مجموع هذه الأشعة غير مُعرَّف.

29. كم نحتاج من النقاط لتحديد مستوى هندسي وحيد؟

(a) نقطة واحدة.

(b) نقطتان.

(c) ثلاث نقاط.

(d) أربع نقاط.

(e) خمس نقاط.

30. عد إلى الشكل – اختبار (0–2). ماذا يمثل المنحنى؟

(a) تابع جيب الزاوية.

(b) تابع جيب تمام الزاوية.

(c) معادلة تربيعية.

(d) معادلة خطية.

(e) تابع لوغاريتمي.

31. عد ثانية إلى الشكل – اختبار (0–2). نظام الإحداثيات في هذا المثال هو

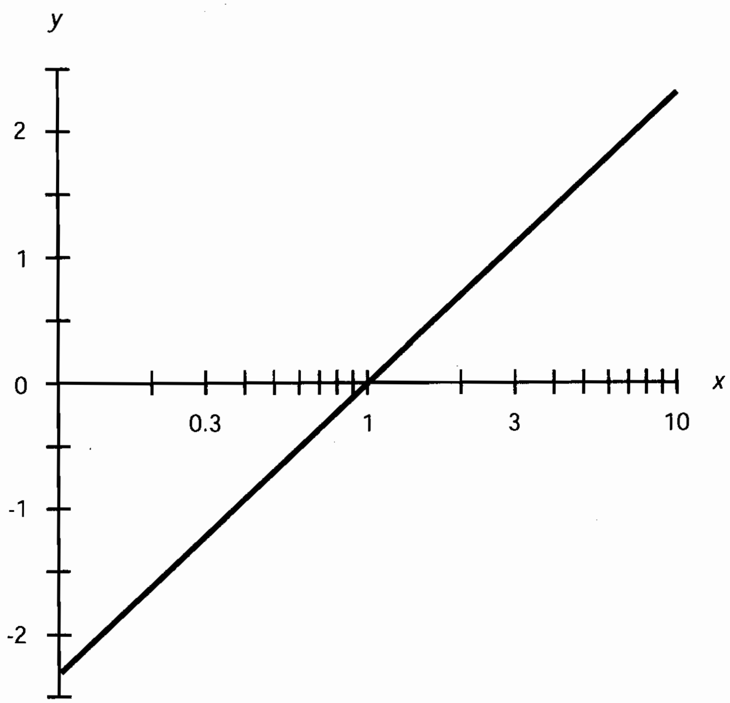
(a) قطبي.

(b) كروي.

(c) نصف لوغاريتمي.

(d) لوغاريتمي – لوغاريتمي.

(e) مثلثي.



الشكل - اختبار (0-2): مثال توضيحي للأسئلة 30 و31.

32. لنفتــرض أن لدينا شعاعين. يتجه الشعاع **a** للأعلى وطويلته تساوي 3، ويتجه الشعاع **b** مباشرة إلى الأفق الغربي وطويلته تساوي 4. للضرب المتصالب **a** × **b** الخصائص التالية:

(a) مقدار سلمي قيمته 12.

(b) شعاع يتجه باتجاه الأفق الجنوبي بطويلة قيمتها 12.

(c) شعاع يتجه للأعلى وباتجاه الغرب بطويلة قيمتها 5.

(d) شعاع يتجه للأسفل بطويلة قيمتها 5.

(e) نحتاج لمزيد من المعلومات للإجابة عن هذا السؤال.

33. حــدِّد باســتخدام الآلــة الحاســبة قــيمة العدد 2 مرفوعاً للقوة $^2/_3$ (أي $2^{2/3}$) بأربعة أرقام هامة. النتيجة هي

(a) 1.587.

(b) 2.828.

(c) 4.000.

(d) 8.000.

(e) العبارة $2^{2/3}$ غير مُعرَّفة ولا يمكن تحديدها بأي وسيلة.

34. يختلف الرقمان 34 و34,000

(a) بعامل مقداره 10.

(b) بثلاث مراتب.

(c) بخمس مراتب.

(d) بسبع مراتب.

(e) بنسبة اختلاف القدم عن الميل نفسها.

35. يُقاس الصعود القائم

(a) بالدرجات.

(b) بالراديان.

(c) بوحدات خطية.

(d) بوحدات لوغاريتمية.

(e) بالساعات.

36. لنأخذ بالاعتبار التابع $y = 2x$ بحيث يقتصر منطلقه على $0 < x < 2$. ما هو مستقر التابع

(a) $0 < y < 1/2$

(b) $0 < y < 1$

(c) $0 < y < 2$

(d) $0 < y < 4$

(e) المعلومات المعطاة غير كافية للإجابة عن هذا السؤال.

37. يمكن كتابة الجذر الخامس للعدد 12 على الشكل

(a) $12^{1/5}$

(b) $12/5$.

(c) 12^5.

(d) 5^{12}.

(e) $5^{1/12}$.

38. لنفترض أنك أُعطيت المعادلة $x^2 + y^2 = 10$. كيف ستبدو هذه المعادلة عند رسمها في الإحداثيات الديكارتية

(a) كخط مستقيم.

(b) كقطع مكافئ.

(c) كقطع ناقص ممدود.

(d) كقطع زائد.

(e) كدائرة.

39. لنفتـــرض أن مُختبراً قد أجرى 10,000 عملية قياس للجهد الكهربائي على خط منـــزلي خلال مدة زمنـــية بلغـــت بضعة أيام، وحصل على رقم وسطي مقداره 115.85 فولت. اعتُبر هذا الجهد الجهد الاسمي للخط. افترض أن مُختبراً آخر أجرى قياساً واحداً وحصل على القيمة 112.20 فولت. النسبة المئوية لانحراف القيمة المقاسة من قبل المراقب عن الجهد الاسمي تساوي تقريباً

(a) ‎−0.03 بالمائة.

(b) ‎+0.03 بالمائة.

(c) ‎+3 بالمائة.

(d) ‎−3 بالمائة.

(e) يستحيل تحديد هذه النسبة من خلال البيانات المقدمة في هذا السؤال.

40. لنفترض وجود شكل هندسي رباعي الأضلاع يقع في مستوى واحد وجميع أضلاعه متساوية الطول. وبالتالي فإن محيط هذا الشكل يساوي

(a) حاصل ضرب طول القاعدة بالارتفاع.

(b) مربع طول أي ضلع.

(c) مجموع أطوال أضلاعه الأربعة.

(d) نصف مجموع أطوال أضلاعه الأربعة.

(e) يستحيل تحديد المحيط دون معرفة المزيد من المعلومات.

41. لنفتـــرض أنك تشاهد برج راديو في سهل مسطح تماماً، ووجدت بأنه يظهر ممتداً للأعلى 2.2° فوق الأفق. كم تبعد قاعدة البرج عن المكان الذي تقف فيه، عبر عن البعد برقمين هامين؟

(a) 0.5 كيلو متر.

(b) 1.0 كيلومتر.

(c) 1.5 كيلومتر.

(d) 2.2 كيلومتر.

(e) نحتاج لمزيد من المعلومات لتحديد البعد.

42. إن حاصل ضرب 3.88×10^{7} بالعدد 1.32×10^{-7} يساوي

(a) 5.12.

(b) 5.12×10^{14}.

(c) 5.12×10^{-14}.

(d) 5.12×10^{49}.

(e) 5.12×10^{-49}.

43. إن جـــيب تمام الزاوية السالبة هو نفسه جيب تمام الزاوية. بمعرفتنا لذلك ومعرفة أن جيب تمام الزاوية $60°$ يساوي 0.5، فماذا يمكننا أن نقول عن جيب تمام الزاوية $300°$ دون إجراء أي حسابات؟

(a) لا شيء، نحتاج لمزيد من المعلومات كي نعرف.

(b) جيب تمام الزاوية $300°$ يساوي 0.5.

(c) جيب تمام الزاوية $300°$ يساوي -0.5.

(d) جيب تمام الزاوية $300°$ يمكن أن يساوي 0.5 أو -0.5.

(e) جيب تمام الزاوية $300°$ يساوي الصفر.

44. إن ميل المستقيم العامودي (المستقيم الموازي لمحور التراتيب) في الإحداثيات الديكارتية

(a) غير محدد.

(b) يساوي 0.

(c) يساوي 1.

(d) متغير، اعتماداً على بعد المستقيم عن المبدأ.

(e) تخيلي.

45. أي العبارات التالية خاطئة؟

(a) يمكن تحديد المثلث بشكل وحيد وفقاً لأطوال أضلاعه.

(b) يمكن تحديد المثلث بشكل وحيد وفقاً لطول ضلع وقياس الزاويتين المجاورتين له.

(c) يمكن تحديد المثلث بشكل وحيد وفقاً لقياس زواياه الداخلية الثلاثة.

(d) جميع المثلثات متساوية الأضلاع متشابهة.

(e) إن للمثلث متساوي الساقين ضلعين متساويين.

46. تُعتبر المعادلة $-4x^2 + 17x = 7$ مثالاً

(a) لمعادلة بمتحولين.

(b) لمعادلة خطية.

(c) لمعادلة تربيعية.

(d) لتابع أسي.

(e) ولا أي عبارة مما ورد أعلاه.

47. إن مجموع عددين أحدهما عدد حقيقي والآخر عدد تخيلي

(a) غير محدد.

(b) عدد غير دوري.

(c) عدد دوري.

(d) عدد مبهم.

(e) عدد عقدي.

48. في علـــم الفلك، تدعى الزاوية المكافئة لزاوية الطول الجغرافي السماوية اعتماداً على الاعتدال الربيعي ومقاسةً بالنسبة إلى النجوم

(a) زاوية الطول الجغرافي.

(b) زاوية السمت.

(c) الصعود القائم.

(d) المسافة القوسية.

(e) دائرة خط الطول.

49. خذ بالاعتبار المستوى الذي يحوي هوائي مُستقبل فضائي على شكل قطع مكافئ أو مرآة. تقطع المرآة أو المُستقبل الفضائي هذا المستوى بمنحنٍ يمكن تحديده بواسطة

(a) الأعداد التخيلية.

(b) معادلة خطية.

(c) معادلة تربيعية.

(d) معادلة تكعيبية.

(e) لا يوجد معادلة خاصة.

50. لنفترض أنك أُعطيت عددين موجبين، أحدهما أكبر من الآخر بمقدار 25 مرتبة، وجرى التعبير عن كل منهما بأربعة أرقام هامة. إذا جمعت هذين العددين وعبرت عن المجموع بعدد ذي أربعة أرقام هامة،

(a) نُهمل العدد الأصغر.

(b) يجب كتابة كلا العددين بشكل كامل.

(c) عليك الحصول على مساعدة الكمبيوتر.

(d) المجموع أكبر من العدد الأكبر بمقدار 25 مرتبة.

(e) يجب طرح العددين، ثم أخذ معاكس النتيجة.

الباب الأول

الفيزياء التقليدية

الفصل 6

الوحدات والثوابت

يستخدم العلماء الوحدات كوسائل للإشارة، وتقدير، وحساب مظاهر العالم والكون. الأعداد تجريد بحد ذاتها. حاول تصور العدد 5 في مخيلتك. تفكر في مجموعة أو كائن: خمس كائنات أو خمس نقاط أو مستقيم بطول خمسة أمتار أو نجمة بخمس نقاط أو مُخمَّس. ولكن هذه المجموعات أو الكائنات ليست عدداً فعلياً. لا يزال من الصعب جداً تصور الجذر التربيعي ($2^{½}$)، أو pi (π) أو اللوغاريتم الطبيعي ذي الأساس (e)، والتي لا تُعتبر أعداداً صحيحة.

يفكر معظم الناس بالأعداد على أنها نقاط على مستقيم تبعد بعداً محدداً عن *المبدأ* أو نقطة الصفر. قد تكون الإزاحة $2^{½}$ وحدة، أو π متر. قد تفكر بفترة زمنية محددة، مثل e ثانية. قد تفكر بالكتلة بالكيلوغرام أو حتى بشيء آخر أكثر غرابة، كشدة التيار الكهربائي *بالأمبير* أو سطوع مصباح ضوئي *بالكانديلا*.

نظم الوحدات

يوجد أشكال أو نظم متنوعة للوحدات الفيزيائية المستخدمة في العالم. يُفضِّل معظم الفيزيائيين *النظام متر–كيلوغرام–ثانية* (mks) والذي يُدعى أيضاً *بالنظام المتري أو النظام الدولي*. يُستخدم *نظام سنتيمتر–غرام–ثانية* (cgs) عادةً بشكل أقل، قلما يُستخدم *نظام قدم–رطل إنكليزي–ثانية* (fps)، الذي يُدعى *بالنظام الإنكليزي*، من قبل العلماء ولكنه شائع بين العامة. لكل نظام عدة وحدات رئيسية أو *أساسية* حيث تُشتق الوحدات الأخرى منها.

النظام الدولي (SI)

يُختصر النظام الدولي إلى SI، والذي يرمز باللغة الفرنسية إلى *النظام الدولي*. وُجد هذا النظام، mks، بشكله الأولي منذ القرن التاسع عشر، ولكن عُرِّف حديثاً بأسلوب بالغ الدقة من قبل المؤتمر العام للأوزان والمقاييس.

تُكمم الوحدات الأساسية في SI كلاً من *الإزاحة*، *والكتلة*، *والزمن*، *والحرارة*، *والتيار الكهربائي*، *ونصوع الضوء*، *وكمية المادة* (بدلالة عدد الذرات أو الجزيئات في العيّنة). تُعرف الوحدات في SI *بالمتر*، *والكيلوغرام*، *والثانية*، *والكلفن* (أو *درجة الكلفن*)، *والأمبير*، *والكانديلا*، *والمول* على التوالي. وسنُعرّف كل منها بتفصيل مقتضب.

نظام CGS

إن الوحدات الأساسية في نظام سنتيمتر-غرام-ثانية (cgs) هي *السنتيمتر* (0.01 متر تماماً)، *والغرام* (0.001 كيلوغرام تماماً)، *والثانية*، ودرجة *سيلسيوس* (تساوي تقريباً القيمة نفسها بالكلفين مطروحاً منها 273)، *والأمبير*، *والكانديلا*، *والمول*. إن الثانية، والأمبير، والكانديلا، والمول في cgs هي نفسها في SI.

النظام الإنكليزي

إن الوحدات الأساسية في نظام قدم-رطل إنكليزي-ثانية (fps)، هي *القدم* (30.5 سنتيمتر تقريباً)، *والرطل الإنكليزي* (يكافئ حوالى 2.2 كيلوغرام في حقل الجاذبية على سطح الأرض)، *والثانية*، ودرجة فهرنهايت، *والأمبير*، *والكانديلا*، *والمول*. إن الثانية، والأمبير، والكانديلا، والمول في fps هي نفسها في SI.

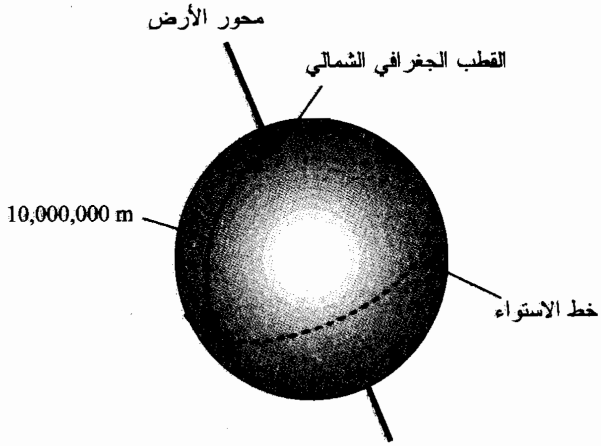
الوحدات الأساسية في SI

إن الوحدات الأساسية في جميع نظم القياس، هي وحدات يمكن أن نشتق باقي الوحدات منها. تُمثّل الوحدات الأساسية بعض أكثر الخصائص الابتدائية أو الظواهر التي نلاحظها في الطبيعة.

المتر

المتر هو الوحدة الأساسية للمسافة أو الطول أو البعد الخطي أو الإزاحة (جميع الاصطلاحات المختلفة تعني بشكل جوهري الشيء نفسه)، ويُرمز للمتر بالحرف الإنكليزي الصغير غير المائل m. دل المتر في البداية على المسافة بين خدشين على قضيب بلاتين معروض في باريس، في فرنسا. ظهرت الفكرة الأصلية من دائرة كبيرة محيطها (10^7 m) تصل بين القطب الشمالي وخط الاستواء على الأرض وتمر بباريس (الشكل (6-1)). تم تجاهل الجبال، والمسطحات المائية، والعوائق الأخرى؛ جرى تخيل الأرض على أنها كرة ملساء مستديرة. يبلغ محيط الأرض حوالى 40 مليون متر (4.0×10^7)، يزداد أو ينقص اعتماداً على اختيارك للدائرة الكبيرة حول الكرة الأرضية.

يُعرَّف المتر هذه الأيام بشكل أكثر دقة وهو المسافة التي تقطعها حزمة ضوئية في فراغ كامل في زمن مقداره 3.33564095 جزء من بليون جزء من الثانية، أي $3.33564065 \times 10^{-9}$ ثانية. ويساوي المتر تقريباً طول خطوة كاملة لراشد عندما يمشي بخطى حثيثة.

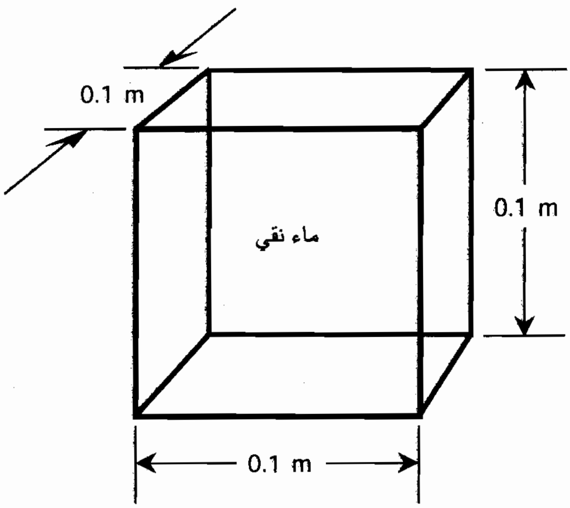


الشكل (6-1): يوجد حوالى 10 مليون متر بين القطب الشمالي للأرض وخط الاستواء.

الكيلوغرام

الكيلو غرام هو الوحدة الأساسية للكتلة في SI، ويُرمز له بحرفين إنكليزيين صغيرين غير مائلين **kg**. جـرى تعـريف الكيلوغرام في البداية على أنه كتلة **0.001** مترٍ مكعب (أو 1 لتر) من الماء السائل النقي (الشكل (6-2)).

لا يـزال هذا التعريف تعريفاً ممتازاً، ولكن ابتكر العلماء هذه الأيام تعريفاً أكثر كمالاً. الكيلوغرام هـو كـتلة عيِّـنة من مزيج من البلاتينيوم-إيريديوم موجودة بالحفظ والصون في المكتب الدولي للأوزان والمقاييس.



الشكل (6-2): عُرِّف الكيلوغرام في البداية على أنه كتلة 0.001 متر مكعب من الماء السائل النقي.

يجب أن تكون واثقاً أن الكتلة ليست *الوزن*. تبقى الكتلة 1 kg نفسها أينما وُجدت. ستكون كتلة قطعة البلاتينيوم-إيريديوم هذه 1 kg على القمر أو على المريخ أو في الفضاء بين المجرات. الوزن في المقابل، هو القوة المؤثرة على الكتلة بواسطة الجاذبية أو التسارع. ستزن كتلة 1 kg على الأرض حوالى 2.2 باوند. بينما ستزن الكتلة نفسها في الفضاء بين الكواكب 0 باوند؛ إنها *عديمة الوزن*.

الثانية

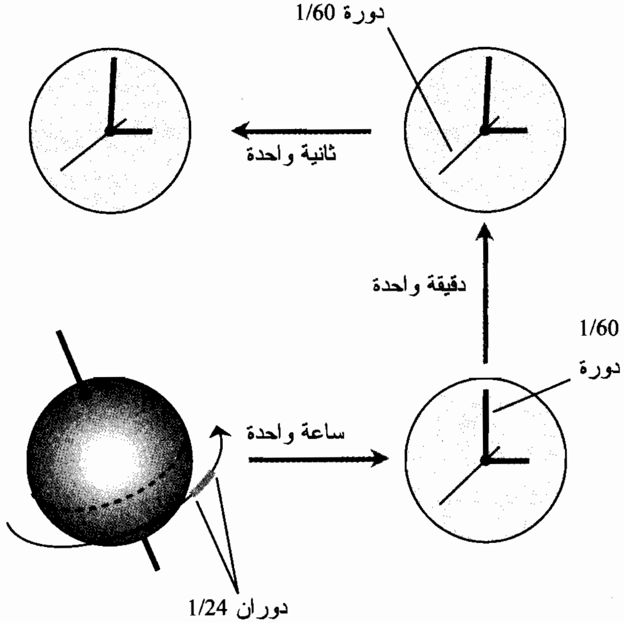
الثانية هي وحدة الزمن في SI، ويُرمز لها بالحرف الإنكليزي الصغير غير المائل s (وفي بعض الأحيان بالاختصار sec). تم تعريف الثانية في البداية على أنها 1/60 من الدقيقة، والتي تساوي بدورها 1/60 من الساعة، والتي تساوي بدورها 1/24 من *متوسط اليوم الشمسي*. وبالتالي فإن الثانية تساوي 1/86,400 من يوم شمسي متوسط، ولا يزال هذا التعريف تعريفاً ممتازاً (الشكل (6-3)). ولكن، تُعرّف 1 s رسمياً هذه الأيام على أنها كمية الزمن التي تستغرقها ذرة سيزيوم مُعينة لتهتز 9.192631770×10^9 هزة كاملة.

يمكن اعتبار الثانية أيضاً على أنها الزمن الذي يستغرقه شعاع ضوئي للانتقال مسافة 2.99792458×10^8 متر في الفضاء. وهذا يساوي ثلاثة أرباع المسافة إلى القمر. ربما تكون قد سمعت بأن القمر يبعد مسافة أكبر بقليل من *ثانية-ضوئية* عن الأرض. ستتذكر إذا كنت كبيراً المحادثات التي جرت بين الأشخاص في المحطة الأرضية ورواد الفضاء في المركبة أبولو الذين مشوا على سطح القمر، وستتذكر التأخير الزمني بين التعليقات أو الأسئلة التي طرحها من هم على الأرض والأجوبة ممن كانوا يمشون على سطح القمر. لم يكن رواد الفضاء يترددون؛ استغرقت إشارات الراديو أكثر من ثانيتين للقيام برحلة بين الأرض والقمر. يمكن اعتبار الزمن وفق أسلوب محدد في التفكير على أنه مظهر أو تعبير للبعد الخطي، والعكس بالعكس. يرتبط كل من المظهرين الطبيعيين بشكل وثيق بسرعة الضوء، والتي افترض ألبرت أينشتاين أنها مطلقة.

الكلفن

الكلفن هي الوحدة الأساسية للحرارة في SI، ويُرمز لها K (حرف كبير وغير مائل). إنها مقياس لمقدار درجة الحرارة بالنسبة للصفر المطلق، والذي يُمثّل الغياب الكامل للحرارة وبالتالي فهو درجة الحرارة الأكثر برودة ممكنة. تُمثّل درجة حرارة 0 K درجة الصفر المطلق. تُعرَّف الكلفن رسمياً على أنها تغيّر في درجة الحرارة (زيادة أو نقصان) بمقدار 0.003661 جزء من درجة الحرارة الترموديناميكية لنقطة ثلاثية من الماء المقطر (النقي). يتجمّد الماء المقطر في مستوى سطح البحر (أو ينصهر) في الدرجة 273.15 +K ويغلي (أو يتكاثف) في الدرجة 373.15 +K.

قد تسأل عن معنى نقطة ثلاثية؟ في حالة الماء، إنها تعني بالضبط نقطة التجمد. بالنسبة للماء، أي درجة الحرارة والضغط التي يمكن أن نجد فيهما الماء على شكل غاز، وسائل، وجليد في حالة التوازن، يمكنك ولأهداف عملية التفكير بها على أنها نقطة التجمد.



الشكل (6–3): بشكل مبدئي تعرف الثانية على أنها جزء من (1/24) (1/60) (1/60) (1/60) أو 1/86,400 من النهار الشمسي.

الأمبير

الأمـــبير هو الوحدة الأساسية للتيار الكهربائي، ويُرمز له بالحرف الإنكليزي الكبير غير المائل A (أو بالاختصار amp)، يُنتج تدفق 6.241506×10^{18} إلكترون بالثانية تقريباً من نقطة ثابتة في ناقل كهربائي تياراً كهربائياً قيمته 1 A.

تُوظَــف عادةً وحدات مختلفة لقياس أو تحديد التيار. *الميلي أمبير* (mA) وهو جزء من ألف جزء من الأمـــبير أو تدفق 6.241506×10^{15} إلكترون بالثانية من نقطة ثابتة. *المايكرو أمبير* (µA) وهو جزء من مليون جزء من الأمبير أو 10^{-6} أمبير، أو تدفق 6.241506×10^{12} إلكترون بالثانية من نقطة ثابتة. *النانو أمبير* (nA) وهو 10^{-9} أمبير؛ وهو أصغر وحدة للتيار الكهربائي يُحتمل أن تسمع بها أو تستخدمها. ويُمثّل تدفق 6.241506×10^{9} إلكترون بالثانية من نقطة ثابتة.

التعـــريف الرسمـــي للأمـــبير نظري إلى حدّ بعيد: 1 A هو تدفق كمية ثابتة من حوامل-الشحنة في وسطين مستقيمين، متوازيين، ورفيعين بشكل لا نهائي، وناقلين بشكل كامل، ويبعدان عن بعضهما مسافة تبلغ 1 متر في الخلاء بحيث تنتج قوة بين الناقلين تبلغ 2×10^{-7} نيوتن لكل متر خطي. يوجد مشكلتان لهذا التعـــريف. الأولى، لم نحـــدد المصطلح *نيوتن* حتى الآن؛ المشكلة الثانية، يطلب التعريف منك تخيل كائنات مثالـــية نظرياً لا يمكن أن تتواجد في العالم الحقيقي. مع ذلك، عليك تخيل ذلك: عاد الفيزيائيون لمشاكسة الرياضيين مرة أخرى. قيل إنه لا يمكن للرياضيين والفيزيائيين أن يعيشوا سوية.

الكانديلا

الكانديلا هي الوحدة الأساسية للشدة الضوئية، ويُرمز لها بحرفين إنكليزيين صغيرين غير مائلين cd. وهـي تـساوي 1/683 جزء من الوات من الطاقة المشعة المنبعثة بتردد 5.4×10^{14} هرتز (دورة بالثانية) بـزاوية صـلبة قيمـتها واحد ستراديان (سنُعرِّف الستراديان باقتضاب). هذه الجملة مليئة بالمصطلحات العويـصة! ولكن، يوجد تعريف أبسط وإن يكن غير متقن: 1 cd تقريباً هي كمية الضوء المنبعثة من شمعة عادية.

التعـريف الآخر عملي ويستطيع الجسم اتباعه بشكل رسمي وهو لا يعتمد على استخدام الوحدات المـشتقة وهـو أكثر دقة من تعريف الشمعة المرجعية. تُمثِّل 1 cd وفقاً لهذا التعريف الإشعاع المنبعث من سطح مساحته 1.667×10^{-6} متر مربع من جسم مشع بشكل كامل يدعى الجسم الأسود في درجة تجمد البلاتين النقي.

المول

المـول هو الوحدة القياسية لكمية المادة، ويُرمز له أو يُختزل بالحروف الإنكليزية الصغيرة غير المائلة mol. ويُعـرف أيـضاً بعدد *أفوغادرو* وهو عدد ضخم ويساوي تقريباً 6.022169×10^{23}. وهو عدد الـذرات الموجود في 0.012 kg من الكربون-12، النظير الأكثر شيوعاً لعنصر الكربون والذي يحوي في نواته على ستة بروتونات وستة نترونات.

يظهـر المـول بشكل طبيعي في عالم الفيزياء، وخاصة في الكيمياء. إنه أحد هذه الأعداد الغريبة التي تبدو الطبيعة وكأنها قد حفظت لها مكاناً خاصاً. وإلا لكان العلماء قد اختاروا بالتأكيد عدداً مُقرباً بالتدوير مثل 1.000 أو ربما 12 (دزينة وحدة).

ملاحظة حول علم الرموز

كـنا وحـتى هذه النقطة صارمين بذكر أن هذه الرموز والاختصارات تتكون من حروف غير مائلة كـبيرة أو صغيرة أو سلاسل من الحروف. إن ذلك هام لأن عدم القيام بالتمييز خاصة في الموضوع المتعلق باسـتخدام الحروف المائلة قد يؤدي للخلط بين رموز أو اختصارات الوحدات الفيزيائية، وبين الثوابت أو المـتحولات أو المُعـاملات التي تظهر في المعادلات. عند كتابة الحرف بشكل مائل، سيمُثِّل دائماً ثابتاً أو مـتحولاً أو مُعـاملاً. عند عدم كتابة الحرف بشكل مائل، سيُمثِّل عادةً وحدة فيزيائية. s هو مثال جيد والذي يُمثِّل الثانية مقابل s، والمستخدم عادةً لتمثيل البعد الخطي أو الإزاحة.

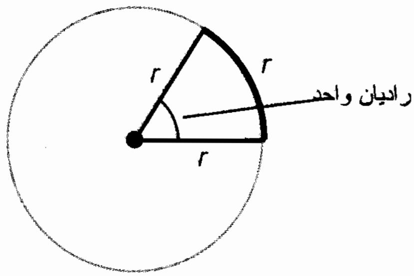
لـن نتطـرق من الآن فصاعداً لهذه المسألة في كل مرة تظهر فيها وحدة أو رمز. ولكن لا تنسَها. يمكـن لهـذا الأمـر الـذي يـبدو بـسيطاً أن يسبب الكثير من المشاكل كما في حالة العمل بالأرقام الهامة!

وحدات أخرى

يمكـــن عادةً ربط الوحدات السبع السابقة بطرق متنوعة بواسطة عمليات الضرب أو القسمة، لتوليد العديـــد من الوحدات الأخرى. يجري التعبير في بعض الأحيان عن هذه *الوحدات المشتقة* بدلالة الوحدات الأساسية، على الرغم من إمكانية أن تكون هذه العبارات مشوشة (مثلاً، ثانية مكعب أو كليوغرام مرفوع للقوة 1−). إذا رأيت مزيجاً من هذه الوحدات في كتاب للفيزياء أو في مقالة أو في بحث بحيث لا تبدو أنها ذات معنى، لا تخف. فأنت تنظر إلى الوحدة المشتقة التي كُتبت بدلالة الوحدات الأساسية.

الراديان

الراديان (rad) هو الوحدة الأساسية *لقياس الزاوية المستوية*. إنه الزاوية المحددة بقوس دائري طوله يساوي نصف قطر الدائرة مقاساً في مستوى هندسي مسطح يحوي الدائرة. تخيل أن تأخذ خيطاً وتمده من مركز الدائرة إلى نقطة ما على المحيط ثم تلف قيمة هذا الطول حول محيط الدائرة وتعيده إلى مركز الدائرة. الزاوية الناتجة هي 1 rad. يوجد تعريف آخر مشابه: الراديان هو الزاوية المحصورة بين الحافتين المستقيمتين للفطيرة بحيث يكون طول حافتي الفطيرة والحافة الدائرية r (الشكل (6−4)). الراديان يساوي تقريباً 57.2958 *درجة زاويّة*.



الشكل (6−4): الراديان هو الزاوية في رأس الفطيرة والتي تكون حوافها المستقيمة والمنحنية ذات طول واحد r.

الدرجة الزاويّة

يُرمـــز للدرجـــة الزاويّة بدائرة صغيرة مرفوعة (°) أو بالاختصار المُكوَّن من ثلاثة حروف deg وتساوي 1/360 مـــن دائرة كاملة. إن تاريخ الدرجة غير محدد، على الرغم من أن إحدى النظريات تقول بأن الرياضيين القدماء اختاروها لأنها تُمثّل تقريباً عدد أيام السنة. تساوي الدرجة الزاوية تقريباً 0.0174533 راديان.

الستراديان

الستراديان هو الوحدة القياسية *لقياس الزاوية الصلبة*، ويُرمز لها بالرمز sr. تُمثّل الزاوية الصلبة 1 sr بمخـــروط يقع رأسه في مركز كرة ويتقاطع مع سطح الكرة بدائرة بحيث يكون السطح المحدد بهذه الدائرة على الكرة مساوياً إلى مربع نصف قطر الكرة. يوجد في الكرة الكاملة 4π أو 12.56636 ستراديان.

النيوتن

النيوتن هو الوحدة القياسية *لقياس القوة الميكانيكية*، ويُرمز له بالحرف N. النيوتن هو كمية القوة اللازمة لجعل كتلة مقدارها 1 kg تتسارع بمعدل متر واحد كل ثانية مربع ($1m/s^2$). تُقاس قوة المحرك الصاروخي أو النفاث بالنيوتن. القوة تساوي إلى الكتلة مضروبة بالتسارع؛ بالعودة إلى الوحدات الأساسية في SI، يكافئ النيوتن كيلوغرام – متر بالثانية مربع ($kg.\ m/s^2$).

الجول

الجول هو الوحدة القياسية للطاقة، ويُرمز له بالحرف J. إنه وحدة صغيرة حقيقة في مصطلحات العالم – الحقيقي. يكافئ الجول نيوتن–متر (n.m). إذا عدنا إلى الوحدات الأساسية في SI، يمكن التعبير عن الجول بدلالة الكتلة مضروبةً بمربع وحدة المسافة مقسومةً على مربع وحدة الزمن:

$$1\ J = 1\ kg.\ m^2/s^2$$

الوات

الوات هو الوحدة القياسية *للقدرة*، ويُرمز له W. يكافئ الوات جولاً واحداً من الطاقة المستهلكة في ثانية واحدة من الزمن (1 J/s). في الحقيقة، القدرة هي قياس معدل إنتاج الطاقة المُنتَجة أو الطاقة المشعَّة أو الطاقة المُستهلكة. يبدو التعبير عن الوات بدلالة الوحدات الأساسية في SI هاماً كما حذرناك:

$$1\ W = 1 kg.\ m^2/s^3$$

الكولون

الكولون هو الوحدة الأساسية *لكمية الشحنة الكهربائية*، ويُرمز له بالحرف C. إنه الشحنة الكهربائية الموجودة في مجموعة تتكون من 6.241506×10^{18} إلكترون تقريباً. ويمكن أن نقول أيضاً أن الكولون هو الشحنة الكهربائية المحتواة في ذلك العدد من البروتونات أو أنتي بروتونات أو البوزيترونات (آنتي إلكترون). عندما تمشي على سجادة وأنت تنتعل حذاءً ذا نعل قاسٍ في الشتاء أو في أي مكان تكون الرطوبة فيه منخفضة جداً، يُكوِّن جسمك شحنة كهربائية ساكنة يمكنُ التعبير عنها بالكولون (أو أكثر احتمالاً جزء من الكولون). بالعودة إلى الوحدات الأساسية، الكولون يساوي أمبير– ثانية (1A.s).

الفولت

الفولت هو الوحدة الأساسية القياسية *للكمون الكهربائي* أو *فرق الكمون*، ويدعى أيضاً *بالقوة المحركة الكهربائية* (emf)، ويُرمز له بالحرف V. إن فولتاً واحداً يكافئ جولاً بالكولون (1J/C). يُعتبر الفولت في العالم الحقيقي وحدة كمون كهربائي صغيرة إلى حدّ ما. تُنتج بطارية جافة قياسية من النوع المستخدم في الإضاءة الومضية (تُدعى بشكل خاطئ *بطارية*)، حوالى 1.5 V. تُنتج معظم البطاريات ذات القوة المحركة والمُصنَّعة في الولايات المتحدة جهداً يتراوح بين 12 و13.5 فولت.

الأوم

الأوم هـــو الوحدة القياسية *للمقاومة الكهربائية*، ويُرمز له بالحرف اليوناني الكبير أوميغا (Ω). عند تطبيق جهد قيمته 1 فولت على مقاومة قيمتها 1 أوم، يتدفق في المقاومة تيار قيمته 1 أمبير. إذاً الأوم يكافئ واحد فولت بالأمبير (V/A).

السيمنـــز

الـــسيمنـــز هـــو الوحدة القياسية *للناقلية الكهربائية*، ويُرمز له بالحرف S وكان سابقاً يدعى ***mho*** وســـترى في بعض الأبحاث والنصوص هذا المصطلح. الناقلية هي مقلوب المقاومة. يمكن اعتبار السيمنـــز على أنه يكافئ أمبير بالفولت (A/V). إذا كانت R مقاومة مُكوِّن ما مقدرة بالأوم وG ناقلية ذلك المُكوِّن بالسيمينـــز، إذاً

$$G = 1/R$$

$$R = 1/G$$

الهرتز

الهرتـــز هو الوحدة القياسية *للتردد*، ويُرمز له Hz. كان يدعى سابقاً *دورة بالثانية* أو ببساطة *دورة*. الهرتز وحدة صغيرة في العالم الحقيقي، ويُمثّل 1 هرتز تردداً صغيراً جداً. يُقاس التردد عادةً بآلاف أو ملايين أو بلايين أو تريليونات الهرتز. تدعى هذه الوحدات *كيلو هرتز* (kHz)، *وميغا هرتز* (MHz)، *وجيغا هرتز* (GHz)، *وتيرا هرتز* (THz)، على التوالي. يُعبَّر عن الهرتز بدلالة وحدات SI بالمقدار (s^{-1})، أي أنه بسيط رياضياً ولكن مفهومه غامض فلا يدركه بعض القُرّاء.

الفاراد

الفـــاراد هـــو الـــوحدة القياسية *للسعة*، ويُرمز له بالحرف F. يكافئ الفاراد واحد كولون بالفولت (1 C/V). الفـــاراد وحدة كبيرة جداً في تطبيقات العالم الحقيقي. تكون معظم قيم السعة التي ستجدها في الـــدارات الإلكترونية والكهربائية من رتبة جزء من مليون أو جزء من بليون أو جزء من تريليون جزء من الفاراد. تدعى هذه الوحدات *بالمايكرو فاراد* (μF) أو *نانو فاراد* (nF)، أو *بيكو فاراد* (pF)، على التوالي.

الهنري

الهنري هو الوحدة القياسية *للتحريض*، ويُرمز له بالحرف H. واحد هنري يكافئ واحد فولت–ثانية بالأمـــبير (V.s/A أو $V.s.A^{-1}$). إنـــه وحدة كبيرة عملياً ولكن ليس بدرجة كبر الفاراد. إن معظم قيم التحـــريض التي ستجدها في الدارات الكهربائية والإلكترونية هي من رتبة جزء من ألف أو جزء من مليون جزء من الهنري. تدعى هذه الوحدات *بالميلي هنري* (mH) *ومايكرو هنري* (μH)، على التوالي.

الويبر

الويبر هو الوحدة القياسية *للتدفق المغناطيسي*، ويُرمز له Wb. الويبر وحدة كبيرة جداً في التطبيقات العملية. واحد ويبر يكافئ واحد أمبير-هنري (1A.H). يُمثّل الويبر في العالم الحقيقي بكمية المغنطيسية المُنتجة بواسطة تيار ثابت مستمر قيمة 1 A يتدفق في ملف تحريضه 1 H.

التسلا

التسلا هو الوحدة القياسية *لكثافة التدفق المغناطيسي*، ويُرمز له T. واحد تسلا يكافئ واحد ويبر بالمتر المربع ($1Wb\backslash m^2$ أو $1Wb.m^{-2}$) وذلك عندما يكون التدفق عامودياً على السطح المُعتبر. يُعبر عن كثافة التدفق المغناطيسي في بعض الأحيان بدلالة "خطوط التدفق" بوحدة مساحة المقطع؛ يُعتبر المصطلح السابق غير دقيق إذا لم نتحدث بدقة عن كيفية تمثيل التدفق المغناطيسي بالخط.

بادئات المضاعفات

يكون استخدام الوحدات القياسية في بعض الأحيان مزعجاً أو صعباً بسبب كبر أو صغر وحدة معينة مقارنة بحجوم الظواهر التي نواجهها بشكل عام في الحياة الحقيقية. رأينا سابقاً بعض الأمثلة الجيدة: وهي الهرتز، والفاراد، والهنري. يستخدم العلماء بادئات المضاعفات، والتي ترتبط بمقدمة الكلمات لتمثيل الوحدات، وذلك للتعبير عن مضاعفات قوة العدد 10 لهذه الوحدات.

في الحالة العامة، تتدرج بادئات المضاعفات بتزايدات قيمها 10^3 أو 3 مراتب، ونزولاً إلى 10^{-24} (جزء من سبتليون جزء من الواحد) وصعوداً حتى 10^{24} (سبتليون). يحتوي هذا المجال على 48 مرتبة! ليس من السهل التفكير بمثال توضيحي للبرهان عن ضخامة هذه النسبة. يوجز الجدول (6-1) بادئات المضاعفات وإلام ترمز.

مسألة (6-1)

لنفترض أنك أُعطيت أن تردد ساعة معالج كمبيوتر 5 GHz. ما هو التردد بالهرتز؟

حل (6-1)

من الجدول (6-1)، نلاحظ أن الجيغا هرتز (GHz) يُمثّل 10^9 Hz. بالنتيجة 5 GHz تساوي 5×10^9 HZ أو بليون Hz.

مسألة (6-2)

مُكثّف قيمته 0.001 µF. ماذا تساوي هذه القيمة بالفاراد؟

حل (6-2)

من الجدول (6-1)، نلاحظ أن µ يرمز إلى مايكرو أو وحدة تساوي 10^{-6}، إذاً 0.001 µF هي 0.001 مايكرو فاراد، وتكافئ 0.001×10^{-6}، $10^{-3} \times 10^{-6} = 10^{-9}$ F. يمكن أن ندعو ذلك

نانــو فـــاراد (1 nF)، ولكن ولبعض الأسباب، نادراً ما يستخدم المهندسون البادئة - نانو عندما يذكرون السعات أو يكتبونها، وبدلاً من ذلك، فهم يُفضلون الالتزام بكتابة هذه القيمة على شكل 0.001 µF. قد يكتبون القيمة السابقة بالشكل 10,000 بيكو فاراد (pF).

مسألة (6-3)

لُمحرِّض تحريض قيمته 0.1 mH. ماذا تساوي هذه القيمة بالمايكرو هنري؟

حل (6-3)

مــن الجـــدول (6-1)، يمكـــن أن تـــرى أن بادئة المضاعف m ترمز إلى الميلي أو 10^{-3}. لذلك، $0.1\ mH = 0.1 \times 10^{-3}\ H = 10^{-4}\ H = 10^{2} \times 10^{-6}\ H = 100\ \mu H$.

الجدول (6-1): بادئات المضاعفات واختصاراتها.

اللقب	الرمز	المضاعف
يوكتو	y	10^{-24}
زيبتو	z	10^{-21}
آتو	a	10^{-18}
فيمتو	f	10^{-15}
بيكو	p	10^{-12}
نانو	n	10^{-9}
مايكرو	µ أو mm	10^{-6}
ميلي	m	10^{-3}
سنتي	c	10^{-2}
ديسي	d	10^{-1}
لاشيء	–	10^{0}
ديكا	da أو D	10^{1}
هيكتو	h	10^{2}
كيلو	K أو k	10^{3}
ميغا	M	10^{6}
جيغا	G	10^{9}
تيرا	T	10^{12}
بيتا	P	10^{15}
إكسا	E	10^{18}
زيتا	Z	10^{21}
يوتا	Y	10^{24}

الثوابت

هي خصائص العالم الفيزيائي والرياضي "التي يمكن التسليم بها على أنها صحيحة". إنها لا تتغير، على الأقل في الحياة العادية للإنسان، إذا لم تتغيّر عوامل أخرى بشكل كبير.

الرياضيات مقابل الفيزياء

في الرياضيات البحتة، تُمثَّل جميع الثوابت عادةً كأعداد صرفة دون أي وحدات مضافة. تُدعى الثوابت عندها *بالثوابت عديمة البعد* وتتضمن π، أي نسبة محيط الدائرة إلى قطرها، وe أساس اللوغاريتم الطبيعي. يوجد في الفيزياء دائماً تقريباً وحدة مكافئة يجري ربطها بالثابت. يشكل الثابت c مثالاً عن ذلك، وهو سرعة الضوء في الفضاء الحر، والذي يجري التعبير عنه بالمتر بالثانية.

يسرد الجدول (6-2) الثوابت التي ستصادفها في الفيزياء. ولا يُمثّل هذا الجدول لائحة كاملة بأي حال. هل تعلم ماذا يعني كل من هذه الثوابت في هذا الجدول؟ هل هي غير مألوفة أو هل هي لغز بالنسبة لك؟ لا تقلق من هذا الآن. إذا تابعت قراءة هذا الكتاب، فإنك ستتعلم معظمها. يمكن أن يخدم هذا الجدول كمرجع بعد إنهائك هذا الكتاب.

هذه بعض الأمثلة عن الثوابت المدرجة في الجدول وكيفية ارتباطها بعالم الفيزياء وأنماط تفكير الفيزيائيين.

كتلة الشمس

يجب أن لا يبدو مفاجئاً لك أن الشمس جسم ضخم. ولكن ما مدى ضخامتها حقيقةً؟ كيف يمكن التعبير عن كتلة الشمس بلغة يمكن فهمها؟ باستخدام التدوين بشكل عام؛ ابتكرنا الرقم 1.989×10^{30} kg وذلك إذا أخذنا أربعة أرقام هامة. إن ذلك أقل بقليل من 2 نونيليون كيلو غرام أو 2 أوكتيليون تون متري. (ذلك لا يساعد كثيراً، أليس كذلك؟).

ما هو مدى كبر 2 أوكتيليون؟ إنه يُمثِّل عددياً بالرقم 2 و27 صفراً على يمينه. إنه بالتدوين العلمي 2×10^{27}. يمكن فصله إلى $2 \times 10^{9} \times 10^{9} \times 10^{9}$. تخيل الآن صندوقاً كبيراً طوله 2,000 كيلومتر (km) وعرضه 1,000 كيلومتر، وعمقه 1.000 km. [ألف كيلومتر تساوي حوالى 620 ميل (mi)؛ 2000 km تساوي حوالى 1240 (mi)]. لنفترض أنه طُلب منك أن تملأ هذا الصندوق بتكديس مكعبات صغيرة طول حرفها 1 ميليمتر (1 mm). إن حجم هذه المكعبات مماثل لحجم حبات الرمل الخشنة.

ستبدأ بتكديس هذه المكعبات الصغيرة باستخدام ملاقط وعدسة مكبرة. عليك أن تحدق في الصندوق وأنت تعلو الغلاف الجوي للأرض وتتجاوز عدة دول وولايات (أو حتى جميع الدول) على سطح الأرض.

الجدول (6-2): بعض الثوابت الفيزيائية.

الكمية أو الظاهرة	القيمة	الرمز
كتلة الشمس	1.989×10^{30} kg	m_{sun}
كتلة الأرض	5.974×10^{24} kg	m_{earth}
عدد أفوغادرو	6.022169×10^{23} mol^{-1}	N أو N_A
كتلة القمر	7.348×10^{22} kg	m_{moon}
متوسط نصف قطر الشمس	6.970×10^{8} m	r_{sun}
سرعة انتشار الحقل الكهرطيسي في الفضاء الحر	2.99792×10^{8} m/s	c
ثابت فاراداي	9.64867×10^{4} C/mol	F
متوسط نصف قطر الأرض	6.371×10^{6} m	r_{earth}
متوسط سرعة دوران الأرض	2.978×10^{4} m/s	
أساس اللوغاريتمات الطبيعية	2.718282	e أو ε
نسبة محيط الدائرة إلى نصف قطرها	3.14159	π
متوسط نصف قطر القمر	1.738×10^{6} m	r_{moon}
الممانعة المُميزّة في الفضاء الحر	376.7 Ω	Z_0
سرعة الصوت في الهواء الجاف ودرجة الحرارة والضغط في الغلاف الجوي قياسية	344 m/s	
تسارع الجاذبية في مستوى سطح البحر	9.8067 m/s^2	g
ثابت الغاز	8.31434 J/K/mol	R أو R_0
ثابت البنية الدقيقة	7.2974×10^{-3}	α
ثابت واين	0.0029 m.k	σ_w
ثابت الإشعاع الثانوي	0.0143883 m.K	C_2
نفاذية الفضاء الحر	1.257×10^{-6} H/m	μ_0
ثابت ستيفان – بولتزمان	5.66961×10^{-8} $W/m^2/K^4$	σ
ثابت الجاذبية	6.6732×10^{-11} $N.m^2/kg^2$	G
سماحية الفضاء الحر	8.85×10^{-12} F/m	$\mathcal{E}_0$
ثابت بولتزمان	1.380622×10^{-23} J/K	k
ثابت الإشعاع الأولي	4.99258×10^{-24} J.m	c_1
وحدة الكتلة الذرية (amu)	1.66053×10^{-27} kg	u
ماغنيتون بور	9.2741×10^{-24} J/T	μ_B

الكمية أو الظاهرة	القيمة	الرمز
نصف قطر بور	5.2918×10^{-11} m	α_0
ماغنيتون النووي	5.0510×10^{-27} J/T	μ_n
كتلة جسيم ألفا	6.64×10^{-27} kg	m_α
كتلة النيترون في السكون	1.67492×10^{-27} kg	m_n
كتلة البروتون في السكون	1.67261×10^{-27} kg	m_p
طول موجة كومبتون للبروتون	1.3214×10^{-15} m	λ_{cp}
كتلة الإلكترون في السكون	9.10956×10^{-31} kg	m_e
نصف قطر الإلكترون	2.81794×10^{-15} m	r_e
الشحنة الأولية	1.60219×10^{-19} C	e
نسبة شحنة الإلكترون-إلى-كتلته	1.7588×10^{11} C/kg	e/m_e
طول موجة كومبتون للإلكترون	2.4263×10^{-12} m	λ_c
ثابت بلانك	6.6262×10^{-34} J.s	h
نسبة كوانتوم-شحنة	4.1357×10^{-15} J.s/C	h/e
ثابت ريدبيرغ	1.0974×10^{7} m^{-1}	R_∞
ثابت أولر	0.577216	γ

يمكنك تخيل المدة التي ستستغرقها لإنهاء هذا العمل. إذا عشت كفاية لإكمال المهمة، ستكدس 2 أوكتيليون مكعب صغير، وهو العدد الذي يُمثّل كتلة الشمس من الطن المتري. الطن المتري أكبر بقليل من الطن الإنكليزي.

من الواضح أن الشمس قطعة كبيرة من المادة. ولكنها صغيرة مقارنة بالنجوم. يوجد الكثير من النجوم الأكبر من شمسنا.

كتلة الأرض

الأرض أيضاً ضخمة، ولكنها ليست إلا نقطة مقارنة بالشمس. تزن الأرض 5.974×10^{24} kg إذا عبرنا عن العدد بأربعة أرقام هامة. وهذا يساوي 6 هكسيليون طن متري تقريباً.

ما هو مدى كبر العدد 6 هكسيليون؟ دعنا نستخدم محاكاة مشابهة ثلاثية الأبعاد. لنفترض أن لدينا صندوقاً مكعباً طول حرفه 2.45×10^5 متر أو 245 كيلومتر. أي إن أبعاد هذا المكعب حوالى 152 mi طول و152 mi عرض، و152 mi عمق. لنتخيل الآن مُزوِّداً غير محدود لمكعبات طول حرفها 1 سنتيمتر (1 cm). ذلك بحجم حجر النرد أو مكعب من السكر. افترض الآن أنه طُلب منك أداء مهمة – لقد ضمنتها الآن – تكديس جميع المكعبات الصغيرة في الصندوق الضخم. عندما تنتهي، ستكون قد وضعت تقريباً 6 هكسيليون مكعب صغير في الصندوق. وهو مقدار ما يحويه كوكبنا من الطن المتري.

سرعة انتشار الحقل الكهرطيسي (EM)

إن سرعة انتشار الحقل الكهرطيسي هي نفسها سرعة الضوء أي حوالى 2.99792×10^8 m/s. وهكذا يكافئ 186,282 ميل بالثانية (mi/s). تنتشر كل من أمواج الراديو، والأشعة تحت الحمراء، والضوء المرئي، والأشعة فوق البنفسجية، وأشعة x، وأشعة غاما بهذه السرعة، والتي سلّم ألبرت أينشتاين بأنها ثابتة أيا تكن نقطة المراقبة.

ما هي هذه السرعة بالضبط؟ تتلخص إحدى طرق فهم هذه المسألة بحساب المدة التي يستغرقها شعاع من الضوء للانتقال من بداية ملعب الغولف إلى مركزه. غالباً ما تُقدَّر هذه المسافة بمقدار 122 متراً أو 400 قدم (ft) تقريباً لحساب الزمن t الذي يستغرقه الشعاع الضوئي للانتقال تلك المسافة، يجب أن نُقسِّم 122 متراً على 2.99792×10^8 m/s:

$$t = 122/(2.99792 \times 10^8)$$
$$= 4.07 \times 10^{-7}$$

إن ذلك العدد أكبر بقليل من أربعة – أعشار مايكرو ثانية (0.4 μs)، وهو مجال زمني صغير جداً.

يجب أن تلاحظ أمرين في هذه اللحظة. الأول، تذكر مبدأ الأرقام الهامة. بررنا انتقالنا إلى ثلاثة أرقام هامة في جوابنا هنا. الثاني، يجب أن تكون الوحدات متوافقة مع بعضها للحصول على جواب ذي معنى. لا تخلط الوحدات في أي عملية حساب فذلك يقود دائماً إلى مشكلة.

إذا كان علينا تناول المسألة السابقة وإجراء الحساب بدلالة الوحدات دون استخدام أي أعداد على الإطلاق، فإننا سنحصل على:

ثانية = متر/(ثانية بالمتر)

$$s = m/(m/s) = m \times s/m$$

اختصرنا المتر في هذه العملية الحسابية، لتبقى الثانية فقط. ولكن افترض أننا نحاول القيام بهذه العملية الحسابية باستخدام القدم للتعبير عن المسافة بين بداية الملعب ومركزه؟ سنحصل إذاً على قيمة ما بوحدات غير محددة؛ ندعوها *الفيوبار* (fb):

فيوبار = قدم/(*متر بالثانية*)

$$fb = ft/(m/s) = ft \times s/m$$

لا يمكن اختصار القدم مع المتر. بالنتيجة لقد اخترعنا وحدة جديدة، وهي الفيوبار وهي مكافئة إلى القدم-ثانية بالمتر. هذه الوحدة غير مفيدة بشكل أساسي، وجوابنا العددي غير مفيد أيضاً. (على انفراد، *fubar* هي كلمة مؤلفة من مجموع أوائل الكلمات "fouled up beyond all recognition".

تذكر دائماً عند إجراء الحسابات أنه يجب أن تكون الوحدات متوافقة! عندما تشك بأن الوحدات غير متوافقة، حوِّل جميع "المعطيات" في المسألة إلى وحدات SI قبل البدء بإجراء الحسابات. ستكون عندها متأكداً من حصولك على جواب بوحدات SI المشتقة وليس وحدات غير محددة أو أي وحدات ليس لها معنى.

تسارع الجاذبية في مستوى سطح البحر

يمكن أن يكون المصطلح *تسارع* مُشوشاً نوعاً ما عند استخدامه للإشارة إلى الجاذبية. أليست الجاذبية مجرد قوة تشد الأشياء؟ إن الجواب على هذا السؤال هو نعم ولا.

من الواضح أن الجاذبية تشد الأشياء باتجاه الأسفل باتجاه مركز الأرض. إذا كنت على كوكب آخر ستجد جاذبية هناك أيضاً، ولكن لن تشدك إليها بالمقدار نفسه من القوة. مثلاً، إذا كان وزنك هنا على الأرض 150 باونداً، فإنك ستزن حوالى 56 باونداً على المريخ. (إذا كانت كتلتك 68 كيلوغراماً، ستكون كتلتك نفسها على المريخ وعلى الأرض).يقيس الفيزيائيون شدة حقل الجاذبية وفقاً لمعدل تسارع جسم ما بـه عند سقوطه في الخلاء حيث لا يوجد للغلاف الجوي مقاومة. يساوي معدل التسارع هذا على سطح الأرض 9.8067 متـر بالثانية مربع تقريباً أو $9.8067\ m/s^2$. وهذا يعني أنه إذا أسقطنا جسماً ما، ولنقل، لوح قرميد، من ارتفاع عالٍ، فإنه سيسقط بسرعة 9.8067 m/s بعد 1 s، وبسرعة تبلغ (9.8067×2) m/s بعـد 2 s، وبسرعة (9.8067×3) m/s بعد 3 s، وهكذا. ستصبح السرعة 9.8067 m/s أكبر مع كل ثانية تمر. يكون معدل التزايد هذا على المريخ أقل. سيكون معدل تزايد السرعة على المشتري أكبر، إذا كان للمشتري سطح قابل للتحديد. سيكون معدل تزايد السرعة على سطح جسم ذي كثافة عالية كنجم نيترون، أكبر بعدة أضعاف مما هو عليه على سطح الأرض.

لا يعـتمد معدل تسارع الجاذبية على كتلة الجسم الذي يجري "شده" بواسطة الجاذبية. قد تفكر بـأن الأجسام الأثقل تسقط بسرعة أكبر من الأجسام الأخف. إن ذلك صحيح في بعض الأحيان بالمعنى العملـي وذلك إذا أسقطنا ولنقل كرة طاولة ثم أسقطنا كرة غولف. ولكن، سبب سقوط كرة الغولف بـشكل أسرع هو أن كثافتها العالية تسمح لها بالتغلب على مقاومة الهواء بشكل أكثر فاعلية من كرة الطاولة. إذا أسقطنا الكرتين في الخلاء، سيسقطان بالسرعة نفسها. قيل إن عالم الفلك والفيزيائي غاليلو غاليلي قد برهن على هذه الحقيقة منذ عدة قرون بإسقاط جسمين ثقيلين، أحدهما أضخم من الآخر، من برج بيزا المائل في إيطاليا. لقد ترك الجسمين في الوقت نفسه، وقد وصلا إلى الأرض في الوقت نفسه. إن ذلـك سـيزعج القرّاء الذين اعتقدوا أن الأجسام الأثقل تسقط بسرعة أكبر من الأجسام الأخف. بدا غاليليو وكأنه يُظهر أن القانون القديم في الفيزياء، والذي كان قد أصبح نصاً في الحقيقة الدينية، خاطئ. يـصف الـناس هـذا النمط من البشر *بالمهرطق* (الهرطقة). أن تُوصَم بالهرطقة تلك الأيام يشبه الاتهام بالإجرام اليوم.

تحويلات الوحدات

أصبح التحويل من نظام إلى آخر في جميع نظم الوحدات المتنوعة والتي هي قيد الاستخدام عبر العالم، موضـوع مادة جميع الكتب. نذرت مواقع وب نفسها لهذه المهمة؛ أمكن في زمن كتابة هذا الكتاب إيجاد موقع جيد في Test and Measurement World (www.tmworld.com). انقر الارتباط " Software" ثم انتقل للصفحة التي تدعى "برامج الحاسبة".

جدول بسيط

يوضح الجدول (6-3) تحويل الكميات التي جرى التعبير عنها بوحدات SI الأساسية إلى وحدات شائعة أخرى. المُعامل هو العدد الذي يجري ضربه بالعدد المرفوع لقوة ما في هذا الجدول وفي أي عبارة للكمية وبأي وحدة.

إنه ليس جدولاً كاملاً بأي معنى. من المدهش معرفة عدد الوحدات المختلفة؛ مثلاً، قد ترغب يوماً ما بمعرفة عدد البوشل (مقياس للحبوب) الموجود في كيلومتر مكعب! تبدو بعض الوحدات وكأنها ابتُكرت ابتكاراً، وكأن المبتكرين قد علموا بالتشويش والذعر اللذين سيلحقهما استخدام هذه الوحدات لاحقاً.

الأبعاد

عند التحويل من نظام وحدات إلى نظام آخر، تأكد دائماً من أنك تتحدث عن الكمية أو الظاهرة نفسها. مثلاً، لا يمكنك تحويل المتر المربع إلى سنتمتر مكعب أو تحويل كانديلا إلى متر بالثانية. يجب أن تُبقي في ذهنك ما تحاول التعبير عنه وأن تكون متأكداً من أنك لا تحاول في الحقيقة تحويل التفاحة إلى برتقالة.

يدعى الشيء الخاص الذي تكممه الوحدة *ببعد الكمية* أو الظاهرة. وبالنتيجة يُمثّل متر بالثانية، وقدم بالساعة، وفرلنغ (ثمن ميل) بالأسبوعين عبارات لبعد السرعة؛ وتُمثّل الثواني والدقائق والساعات بعد الزمن. ترتبط الوحدات دائماً بالأبعاد. وينطبق هذا الأمر على الثوابت، على الرغم من وجود بعض الثوابت التي ترمز لنفسها (π و e مثالان معروفان بشكل جيد).

مسألة (6-4)

لقد وقفت على ميزان وأشار إلى أنك تزن 63 كيلوغراماً. كم باونداً يُمثّل ذلك الوزن؟

حل (6-4)

افترض أنك على كوكب الأرض، وبالتالي يمكن باستخدام الجدول (6-3) تحويل الكتلة-إلى-وزن بطريقة ذات معنى. (تذكر، الكتلة ليست الوزن). نضرب العدد 63 بالعدد 2.205 لنحصل على 139 باونداً. بما أن الكتلة أُعطيت برقمين هامين فقط، يجب تقريبها بالتدوير إلى 140 باونداً كي تكون علمياً صرفاً.

مسألة (6-5)

افترض أنك تقود في أوروبا، والسرعة محددة 90 كيلومتراً بالساعة (km/h). كم يساوي هذا العدد مقدراً بالميل بالساعة (mi/h)؟

الجدول (6–3): التحويلات من الوحدات الأساسية في النظام الدولي (SI) إلى وحدات من نظم أخرى (عندما لا تُعطى أي مُعاملات، يكون ذلك المُعامل واحد تماماً).

لتحويل	إلى	اضرب بالعدد	وبشكل معاكس اضرب بالعدد
متر (m)	أنغشتروم	10^{10}	10^{-10}
متر (m)	نانو متر (nm)	10^{9}	10^{-9}
متر (m)	ماكرون (μ)	10^{6}	10^{-6}
متر (m)	ميلي متر (mm)	10^{3}	10^{-3}
متر (m)	سنتيمتر (cm)	10^{2}	10^{-2}
متر (m)	بوصة (in)	39.37	0.02540
متر (m)	قدم (ft)	3.281	0.3048
متر (m)	ياردة (yd)	1.094	0.9144
متر (m)	كيلو متر (km)	10^{-3}	10^{3}
متر (m)	ميل (mi)	$10^{-4} \times 6.214$	$10^{3} \times 1.609$
متر (m)	ميل بحري	$10^{-4} \times 5.397$	$10^{3} \times 1.853$
متر (m)	ثانية ضوئية	$10^{-9} \times 3.336$	$10^{8} \times 2.998$
متر (m)	وحدة فلكية (AU)	$10^{-12} \times 6.685$	$10^{11} \times 1.496$
متر (m)	سنة ضوئية	$10^{-16} \times 1.057$	$10^{15} \times 9.461$
متر (m)	بارسس	$10^{-17} \times 3.241$	$10^{16} \times 3.085$
كيلو غرام (kg)	وحدة الكتلة الذرية (amu)	$10^{26} \times 6.022$	$10^{-27} \times 1.661$
كيلو غرام (kg)	نانو غرام (ng)	10^{12}	10^{-12}
كيلو غرام (kg)	مايكرو غرام (μg)	10^{9}	10^{-9}
كيلو غرام (kg)	ميلي غرام (mg)	10^{6}	10^{-6}
كيلو غرام (kg)	غرام (g)	10^{3}	10^{-3}
كيلو غرام (kg)	أونصة (oz)	35.28	0.02834
كيلو غرام (kg)	باوند (lb)	2.205	0.4535
كيلو غرام (kg)	طن إنكليزي	$10^{-3} \times 1.103$	907.0
ثانية (s)	دقيقة (min)	0.01667	60.00
ثانية (s)	ساعة (h)	$10^{-4} \times 2.778$	$10^{3} \times 3.600$
ثانية (s)	يوم (dy)	$10^{-5} \times 1.157$	$10^{4} \times 8.640$
ثانية (s)	سنة (yr)	$10^{-8} \times 3.169$	$10^{7} \times 3.156$
ثانية (s)	قرن	$10^{-10} \times 3.169$	$10^{9} \times 3.156$

لتحويل	إلى	اضرب بالعدد	وبشكل معاكس اضرب بالعدد
ثانية (s)	ألفية	3.169×10^{-11}	3.156×10^{10}
درجة كلفن (K)	درجة سيلسيوس (°C)	اطرح 273	أضف 273
درجة كلفن (K)	درجة فهرنهايت (°F)	اضرب بالعدد 1.80، ثم اطرح 459	اضرب بالعدد 0.556، ثم أضف 255
درجة كلفن (K)	درجة رانكين (°R)	1.80	0.556
أمبير (A)	حامل بالثانية	6.24×10^{18}	1.60×10^{-19}
أمبير (A)	ستات أمبير (Stat A)	2.998×10^{9}	3.336×10^{-10}
أمبير (A)	نانو أمبير (nA)	10^{9}	10^{-9}
أمبير (A)	مايكرو أمبير (µA)	10^{6}	10^{-6}
أمبير (A)	أب أمبير (abA)	0.10000	10.000
أمبير (A)	ميلي أمبير (mA)	10^{3}	10^{-3}
كانديلا (cd)	مايكرو واط بالستيراديان (µW/sr)	1.464×10^{3}	6.831×10^{-4}
كانديلا (cd)	ميلي واط بالستيراديان (mW/sr)	1.464	0.6831
كانديلا (cd)	لومن بالستيراديان (lum/sr)	تطابق؛ لا يوجد تحويل	تطابق؛ لا يوجد تحويل
كانديلا (cd)	واط بالستيراديان (W/sr)	1.464×10^{-3}	683.1
مول (mol)	كولون (C)	9.65×10^{4}	1.04×10^{-5}

حل (6-5)

تحتاج في هذه الحالة لأن تعرف تحويل الميل إلى كيلومتر؛ لا يتغيّر الجزء "بالساعة". بالنتيجة قم بتحويل الكيلومترات إلى أميال. تذكر أولاً أن 1 km = 1,000 m؛ وبالتالي فإن 90 km = 90,000 m = 9.0×10^4 m. يتطلب التحويل من متر إلى ميل (الميل المستخدم على اليابسة) الضرب بالعدد 6.214×10^{-4}. لذلك اضرب 9.0×10^4 بالعدد 6.216×10^{-4} للحصول على 55.926. يجب تقريب هذا العدد بالتدوير إلى 56 أو إلى رقمين هامين، لأن كمية السرعة المحدودة المعلنة 90 وبالتالي عليك الإسراع.

مسألة (6-6)

ما هي قيمة السرعة الحدية في المسألة (6-5) مقدرة بالقدم بالثانية؟

حل (6-6)

سنحل هذه المسألة بخطوتين. لقد أُعطيت السرعة بالكيلومتر بالثانية. يجب تحويل الكيلومتر إلى

قدم، ويجب أيضاً تحويل الساعات إلى ثوان. يجب القيام هاتين الخطوتين بشكل منفصل. إن الترتيب الذي يجري به التحويل غير هام، ولكن يجب القيام بكلا التحويلين بشكل مستقل إذا أردت تجنب التشويش. (ستنفّذ بعض برامج الحاسبة على الوب هذه العملية لك بلحظة، ولكن لدينا الآن الجدول (6-3)).

دعنا نُحوِّل أولاً كيلومتر بالساعة إلى كيلومتر بالثانية. يتطلب ذلك التقسيم على 3,600، وهو عدد الثواني في الساعة. وبالنتيجة 90 km/h = 90/3600 km/s = 0.025 km/s. دعنا الآن نحول كيلومتر إلى متر؛ بالضرب بالعدد 1,000 لنحصل على 25 m/s كسرعة حدية معلنة. في النهاية، حوِّل المتر إلى قدم؛ اضرب 25 بالعدد 3.281 للحصول على 82.025. يجب تقريب هذا العدد بالتدوير وبالتالي سنحصل على العدد 82 ft/s، وذلك لأنه جرى التعبير عن السرعة الحدية المعلنة برقمين هامين.

امتحان موجز

عد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت على ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. المول هو وحدة تُعبِّر عن
   (a) عدد الإلكترونات بالأمبير.
   (b) عدد الجزيئات في عينة.
   (c) المسافة من الشمس إلى الكوكب.
   (d) الزمن المطلوب للإلكترون ليدور حول النواة.
2. الجول يكافئ
   (a) قدم - باوند.
   (b) متر بالثانية.
   (c) كيلوغرام بالمتر.
   (d) وات - ثانية.
3. يتدفق تيار 3 A في ملف تحريضه 1 H. التدفق المغناطيسي الناجم عن هذا التيار
   (a) 3 wb.
   (b) 3 H.
   (c) 3 T.
   (d) يستحيل تحديده من هذه المعلومات.

4. يـــولد مُزوِّد ضوئي طاقة تكافئ 4.392 mW/sr في ذروة الطول الموجي المرئي. تساوي هذه القيمة تقريباً

(a) 6.4×10^{-6} cd.

(b) 3.0 cd.

(c) 6.4 cd.

(d) 3.0×10^{-6} cd.

5. تُمثِّل درجة الحرارة 0 K

(a) نقطة تجمد الماء النقي في مستوى سطح البحر.

(b) نقطة غليان الماء النقي في مستوى سطح البحر.

(c) غياب الحرارة بكاملها.

(d) لا شيء، إنه مصطلح لا معنى له.

6. النيوتن يكافئ

(a) كيلوغرام – متر.

(b) كيلو غرام – متر بالثانية.

(c) كيلوغرام – متر بالثانية مربع.

(d) كيلوغرام – متر بالثانية مكعب.

7. يمكنك تحويل الكيلوغرام إلى باوند فقط إذا عرفت

(a) درجة الحرارة.

(b) كتلة الجسم في السؤال.

(c) شدة حقل الجاذبية.

(d) كمية المادة.

8. نظام SI هو شكل مُوسَّع

(a) للنظام الإنكليزي.

(b) للنظام المتري.

(c) للنظام الأوروبي.

(d) للنظام الأميركي.

9. الراديان هو وحدة

(a) لشدة الضوء المرئي.

(b) لدرجة الحرارة.

(c) لقياس الزاوية الصلبة.

(d) لقياس الزاوية المستوية.

10. الباوند هو وحدة

(a) الكتلة.

(b) المادة.

(c) كمية المادة.

(d) لا شيء مما ورد أعلاه.

الفصل 7

الكتلة، والقوة، والحركة

كان الفيزيائيون الأوائل فضوليين بشأن الطريقة التي تتصرف بها المادة: ماذا يحدث لأجزاء المادة عندما تتحرك المادة أو عندما تتعرض لقوى. بدأ العلماء بالقيام بالتجارب، ثم حاولوا تطوير *نماذج* رياضية (نظريات) لشرح ما يحدث وتوقع ما يمكن أن يحدث في الحالات المستقبلية. يعالج هذا الفصل *الميكانيك التقليدي*، ودراسة الكتلة، والقوة، والحركة.

الكتلة

يشير مصطلح *الكتلة*، كما يستخدمه الفيزيائيون، إلى كمية المادة بدلالة قدرتها على مقاومة الحركة عند تطبيق *قوة* عليها. *الثقل* هو مرادف جيد للكتلة. لكل جسم مادي كتلة خاصة قابلة للتحديد. للشمس كتلة معينة؛ للأرض كتلة أصغر بكثير من كتلة الشمس. للرصاصة كتلة أصغر بكثير جداً من كتلة الأرض. يوجد حتى *لجزيئات* الذرات كالبروتونات والنترونات كتلة. تتصرف *جزيئات* الضوء المرئي، المعروفة *بالفوتونات* في بعض الحالات، *كجزيئات* لها كتلة. يضغط الشعاع الضوئي على أي سطح يسقط عليه. يكون الضغط خفيفاً، ولكنه موجود ويمكن قياسه في بعض الأحيان.

للكتلة مقدار سلّمي

لكتلة الجسم أو الجزيء طويلة (حجم أو طول) ولكن ليس لها اتجاه. يمكن تمثيل الكتلة، ككتلة الشمس أو كتلة الأرض بعدد مُعيَّن من الكيلوغرامات. يُشار إلى الكتلة عادةً بالحرف الصغير المائل m.

قد تظن أن للكتلة اتجاهاً. عندما تقف في مكان ما، يضغط جسمك باتجاه الأسفل على أرض الغرفة أو الرصيف أو الأرض. إذا كان لشخص ما كتلة أكبر من كتلتك، سيضغط جسمه باتجاه الأسفل أيضاً ولكن بشكل أقوى. إذا ركبت سيارة وتسارعت هذه السيارة سيضغط جسمك على المقعد باتجاه الخلف وكذلك سيضغط جسمك باتجاه الأسفل باتجاه مركز الأرض. ولكن هذه قوة، وليست كتلة. إن القوة التي تشعر بها سببها كتلتك من جهة ومن جهة أخرى الجاذبية أو التسارع. الكتلة نفسها ليس لها اتجاه. ستكون كتلتك

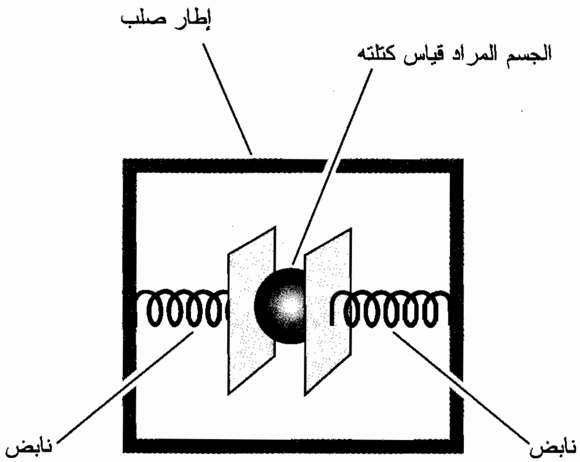
علـــى الأرض نفسها إذا ذهبت إلى الفضاء الخارجي وأصبحت في حالة انعدام الوزن (على افتراض أنك لم تفقد وزناً أو تكسبه بين الزمنين). لن يكون لأي قوة أي اتجاه إذا لم تبدأ المركبة الفضائية بالتسارع.

كيفية تحديد الكتلة

إن الطريقة الأبسط لتحديد كتلة جسم ما، هي بوزنه بالميزان. ولكنها ليست الطريقة الأفضل. عندما تضع شيئاً على الميزان، فأنت تقيس *وزنه* في حقل الجاذبية الأرضي. تبقى شدة حقل الجاذبية، بالنسبة لمعظم الأهداف العملية نفسها في أي مكان في الكوكب. إذا رغبت بتتبع التغيّرات الصغيرة، يتغيّر وزن كتلة معينة تغيّـــراً طفـــيفاً بتغيّر الموقع الجغرافي. سيُظهر ميزان دقيق بدقة كافية أن جسماً معيناً كالرصاصة أثقل قليلاً عندما يكون في خط الاستواء منه عندما يكون في القطب الشمالي. الوزن يتغيّر ولكن الكتلة لا.

افترض أنك تقوم برحلة بين الكواكب، وأنك تسافر إلى المريخ أو أنك تدور في مدار حول الأرض، وكل شيء في مركبتك الفضائية عديم الوزن. كيف يمكنك قياس كتلة طلقة الرصاص في هذه الشروط؟ إنها تسبح داخل الحجرة (القمرة) مع جسمك، وكذلك تسبح أقلام الرصاص التي تكتب بها، ويسبح كل شيء باســـتثناء مـــا هو مقيد. أنت على اطلاع أن طلقة الرصاص أضخم من ولنقل حبة البازيلاء، ولكن كيف يمكنك قياسها لتتأكد من ذلك؟

تـــتطلب إحـــدى طرق قياس الكتلة، بشكل مستقل عن الجاذبية، استخدام زوج من النوابض من خلال تثبيـــتها بإطار مع وضع الجسم في الوسط (الشكل (7-1)). إذا وضعت شيئاً ما بين النابضين وسحبته في أحد الاتجـــاهين عندها سيهتز الجسم. إذا جربت ذلك مع حبة البازيلاء، ستهتز النوابض بسرعة. أما إذا جربت ذلك مرة أخرى مع طلقة الرصاص، فإن النوابض ستهتز ببطء. يجري تثبيت "مقياس الكتلة" هذا على منصة (منضدة) في حجرة المركبة الفضائية، والتي تكون مثبتة بدورها (المنصة) "بأرض الحجرة" (ولكن قد تقوم بتحديد ذلك في بيئة انعدام الوزن). يحفظ تثبيت الميزان الجهاز بكامله من الاهتزاز جيئةً وذهاباً في الوسط بعد بدء اهتزاز الجسم.



الشكل (7-1): يمكن قياس الكتلة من خلال وضع جسم بين زوج من النوابض وجعله يهتز في بيئة انعدام الوزن.

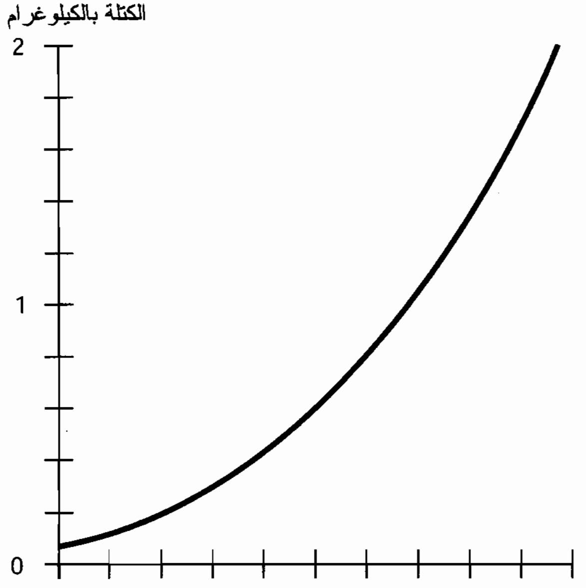
يجب معايرة هذا النوع من الموازين سلفاً قبل أن يتمكن من إظهار أرقام ذات معنى للكتل والأجسام. سينتج عن المعايرة منحنى يوضح دور أو تردد الاهتزاز كتابع للكتلة. حالما يجري التعيير في بيئة انعدام الوزن ويجري رسم المنحنى، يمكنك عندها استخدامه لقياس كتلة أي جسم كتلته في حدود المعقول. ستُلغى القراءات إذا حاولت استخدام "مقياس الكتلة" المستخدم على الأرض أو القمر أو المريخ بسبب وجود قوة خارجية، أي الجاذبية، التي تؤثر على هذه الكتلة. ستحدث المشكلة نفسها إذا حاولت استخدام المقياس عندما تكون مركبة الفضاء في حالة تسارع بدلاً من سيرها دون تسارع في الفضاء أو دورانها في الفضاء.

المسألة (7−1)

افترض أنك وضعت جسماً مشابهاً للجسم الموضح في الشكل (7−1) في مقياس للكتلة. افترض أيضاً أن منحنى المعايرة كتلة – بدلالة – تردد لهذا الجهاز مُحدد ويبدو كمنحنى الشكل (7−2). يهتز الجسم بتردد 5 دورات كاملة بالثانية (أي 5 هيرتز أو 5 Hz). ما هي الكتلة التقريبية لهذا الجسم؟

الحل (7−1)

أوجد التردد على المحور الأفقي. ارسم مستقيماً عامودياً (أو أنشئ عاموداً) موازياً للمحور العامودي (الكتلة). حدّد النقطة التي يتقاطع بها الخط المستقيم مع المنحنى. ارسم خطاً أفقياً من هذه النقطة باتجاه اليسار حتى يتقاطع مع محور الكتلة. اقرأ الكتلة على المحور. إنها تساوي تقريباً 0.8 kg، كما هو موضح في الشكل (7−3).



الشكل (7−2): منحنى الكتلة بدلالة تردد الاهتزاز "لمقياس كتلة" افتراضي كالمقياس الموضح في الشكل (7−1).

مسألة (7-2)

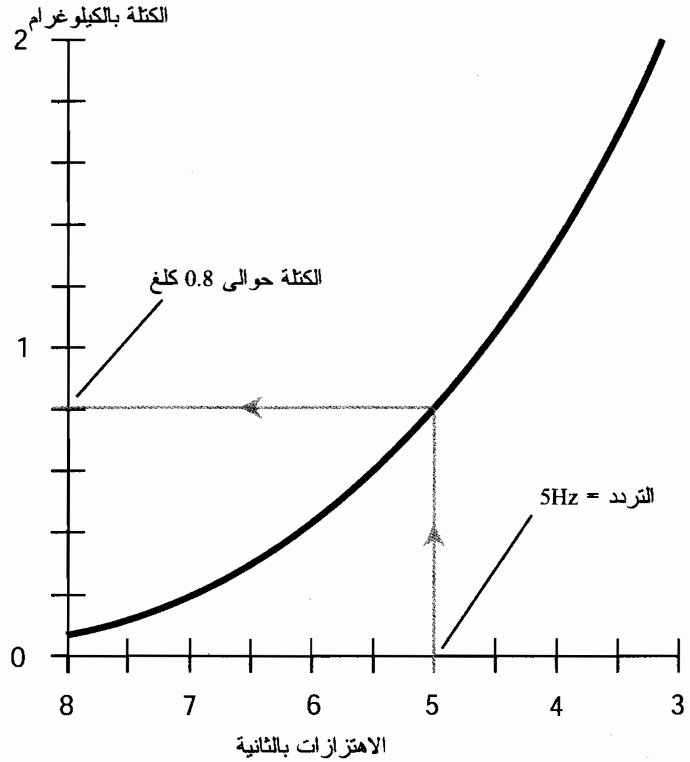
ماذا يمكن أن يفعل "مقياس الكتلة" الموضح في الشكل (7-1)، وماذا سيفعل تابع الكتلة - بدلالة - التـــردد المرســـوم في الشكل (7-2) والشكل (7-3)، إذا كانت الكتلة 0.000001 kg فقط موضوعة بين النابضين (أي 1 ميلي غرام أو mg1)؟

حل (7-2)

ســـيهتز المقياس بشكل أساسي بتردد موافق للكتلة صفر. هذه القيمة خارج منحنى المقياس في هذا المثال. قد تفترض بداية أن تردد الاهتزاز سيكون كبيراً جداً، ولكن في الحقيقة، سيهتز أي "مقياس عملـــي للكتلة" بتردد أعظمي محدد حتى لو لم توضع كتلة بين النابضين. يحدث ذلك لأن النوابض والملازم لها كتلة.

مسألة (7-3)

ألـــيس من الأسهل والأكثر دقة في الحياة الحقيقية برمجة تابع كتلة - بدلالة - تردد كمبيوترياً بدلاً مـــن استخدام منحنيات كالمنحنيات الموضحة هنا؟ ألا يمكننا بهذه الطريقة إدخال بيانات التردد إلى الكمبيوتر وقراءة الكتلة على جهاز عرض كمبيوتري.



الشكل (7-3): حل المسألة (7-1).

حل (7-3)

نعم، إن طريقة كهذه ستكون سهلة، وهذا ما يقوم به الفيزيائي بالضبط في الحياة الحقيقية. في الحقيقة، نتوقع أن يكون للمقياس مايكرو كمبيوتر مبيت فيه، وأن تكون له شاشة عرض رقمية تخبرنا بالكتلة مباشرة.

القوة

تخيل مرة أخرى أنك رائد فضاء تدور في مدار حول الأرض، وكل شيء داخل الحجرة منعدم الوزن. وتخيل جسمين يسبحان أمامك: الطوب والرخام. أنت تعلم أن الطوب أثقل من الرخام. ولكن، يمكن جعل كلٍّ من الطوب والرخام يتحرك ضمن الحجرة إذا قمت بدفعهما.

افترض أنك نقرت الطوب بإصبعك. سيسبح الطوب عندها في الحجرة ويرتد عن الجدار. افترض أنك نقرت الطوب بإصبعك بقوة أكبر (ليس كثيراً أو ليس قليلاً). سيستغرق الطوب عدة دقائق ليسبح في الحجرة ويصطدم بالجدار المقابل. ستقدم نقرة إصبعك للطوب أو الرخام قوة للحظة، ولكن لتلك القوة تأثير يختلف في الطوب عنه في الرخام.

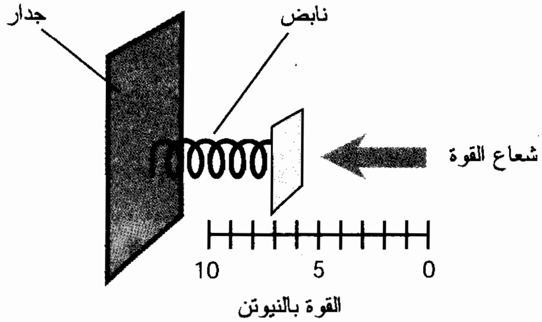
القوة كشعاع

القوة كمية شعاعية. يمكن أن يكون للقوة أي طويلة، من نقرة الإصبع إلى ركلة القدم أو لقوة انفجار البارود في المدفع طويلة أو لقوة اندفاع المحرك الصاروخي طويلة. للقوة دائماً اتجاه محدد. يمكنك إطلاق النار من البندقية بالاتجاه الذي ترغب به (وتتحمل النتائج طبعاً إذا حصل مكروه). يُرمز للأشعة عادةً بحروف أبجدية عريضة. يمكن أن نشير إلى شعاع القوة مثلاً بالحرف العريض الكبير **F**.

يكون اتجاه القوة في بعض الأحيان غير هام. يمكن أن نتكلم عن طويلة شعاع القوة في بعض الأمثلة ونشير إليه بالحرف المائل الكبير *F*. الوحدة الدولية القياسية لطويلة القوة هي *النيوتن* (N)، والتي تكافئ كيلوغرام-متر بالثانية مربع ($kg.m/s^2$). لنفترض أن كتلة الطوب في مركبتك الفضائية هي 1 kg وأنك دفعتها بقوة 1 N لمدة 1 s وتركتها تذهب. ستنتقل قطعة الطوب من الحالة المستقرة (مع أخذ الشروط المحيطة بالاعتبار) إلى حالة تكون فيها سرعتها 1 m/s، ومع ذلك فإنها قد تبدو أبطأ إذا لم يضربها أحد ما.

كيفية تحديد القوة

يمكن قياس القوة من خلال تأثيرها على كتلة الجسم. ويمكن قياسها من خلال كمية الانحراف أو التشوه الذي تُحدثه في جسم مرن كالنابض. يمكن تعديل "مقياس الكتلة" الموصوف سابقاً لتحديد الكتلة بحيث نصنع "مقياس قوة" وذلك بإلغاء أحد نصفيه واستبداله بمقياس مُعيَّر (الشكل (7-4)). يجب معايرة هذا المقياس سلفاً في بيئة المخبر.



الشكل (7–4): القوة بالمتر.

الإزاحة

تعــرف *الإزاحة* أيضاً *بالمسافة*. تُحدد الإزاحة على طول خط مستقيم إذا لم يُحدد خلاف ذلك. قد نقــول أن Minneapolis, Minnesota تبعد عن Rochester, Minnesota، مسافة 100 km على خط مستقيم. إذا كنت تقود على طول طريق U.S. Route 52، فإن الإزاحة (المسافة) ستصبح 120 km لأن الطريق لا يتبع مساراً مستقيماً من Rochester إلى Minneapolis.

الإزاحة كشعاع

تكــون الإزاحة عند تحديدها على خط مستقيم كمية شعاعية لأن لها طويلة (والتي يمكن التعبير عنها بالمتــر أو الكيلومتر أو وحدات المسافة الأخرى) ولها اتجاهاً (والذي يمكن تحديده بطرق مختلفة). يُشار إلى طــويلة الإزاحــة بحرف صغير مائل؛ دعنا ندعوه q. يُشار إلى شعاع الإزاحة بحرف صغير عريض. دعنا نستخدم في هذا البحث الحرف **q**.

ســيكون شعاع الإزاحة $\mathbf{q}_{rm}$ لمدينة Minneapolis بالنسبة إلى مدينة Rochester تقريباً 100 km باتجاه الشمال الغربي "على خط مستقيم". ستكون زاوية السمت بحدود 320 درجة، مقاسة باتجاه عقارب الـــساعة انطلاقاً من الشمال الحقيقي. ولكن، لو تحدثنا عن القيادة على الطريق Route 52، فلا يمكننا أن نحـــدد الإزاحة كشعاع لأن الاتجاه يتغيّر نتيجة انحناءات الطريق، صعوداً عبر التلال، ونـــزولاً إلى الوديان. يجـــب أن نُشير في هذه الحالة إلى الإزاحة كمقدار سُلّمي، بحرف صغير مائل عادةً. دعنا نستخدم في هذا البحث q ولنكتب $q_{rm} \approx 120$ km.

كيفية تحديد الإزاحة

يجـــري تحديـــد طويلة الإزاحة من خلال القياس الميكانيكي للمسافة أو باستنتاجها من خلال الملاحظات والحـــسابات الرياضـــية. في حالة قيادة سيارة أو جرار على طول الطريق Route 52، تُقاس الإزاحة (المسافة) بواسطة *عداد المسافة المقطوعة* الذي يعدّ عدد دورات العجلة ويضربه بمحيط العجلة. يمكن قياس طويلة الإزاحة

في بيئة المختبر بواسطة *meter stick*، وذلك بإجراء القياس *بالاستعانة بعلم المثلثات* أو بقياس الزمن الذي يستغرقه الشعاع الضوئي للانتقال بين نقطتين معروفتين ومعرفة السرعة الثابتة للضوء ($c \approx 2.99792 \times 10^8$ m/s).

يجري تحديد مُركّبة اتجاه شعاع الإزاحة بقياس زاوية أو أكثر أو بقياس الإحداثيات بالنسبة لمحور مرجعي. يمكن في حالة منطقة محلية على سطح الأرض، إيجاد الاتجاه من خلال تحديد *زاوية السمت*، وهي الزاوية بالنسبة للشمال الحقيقي مقاسة باتجاه عقارب الساعة. إنها الطريقة المستخدمة من قبل الرحّالة والمتجولين. تُستخدم زوايا الاتجاه في الفضاء ثلاثي الأبعاد. يُحدد المحور المرجعي مثلاً بشعاع يتجه باتجاه نجمة الشمال. وبالتالي تُحدَّد زاويتان في نظام إحداثيات يعتمد على هذا المحور. النظام الأكثر شيوعاً والمستخدم من قبل علماء الفلك وعلماء الفضاء زوايا تدعى *بزوايا الطول الجغرافي وزوايا العرض الجغرافي* أو يستطلب، بدلاً من ذلك، *زوايا الصعود القائم وزوايا الانحراف*. جرى تعريف هذه الزوايا في الفصل الثالث. (إذا لم تكن هذه الزوايا مألوفة بالنسبة لك، وإذا لم تدرس الباب صفر، فقد يكون هذا الوقت هو الوقت المناسب لإعادة اتخاذ القرار!).

السرعة

السرعة هي تعبير عن معدل انتقال جسم ما بالنسبة إلى نقطة مراقبة مرجعية مُعينة. يُعتبر الإطار المرجعي *مستقراً* على الرغم من نسبية المصطلح. يعتبر الشخص الذي يقف على سطح الأرض نفسه مستقراً، ولكن ذلك ليس صحيحاً بالنسبة للنجوم البعيدة أو الشمس أو القمر أو حتى بالنسبة لمعظم الأجرام السماوية.

السرعة مقدار سلّمي

الوحدة القياسية للسرعة هي متر بالثانية (m/s). قد يكون للسيارة التي تسير في شارع Route 52 جهاز تحكم بالمسير يمكنه أن يضبط السرعة وليكن على القيمة 25 m/s. ولنفترض أن جهاز التحكم بالمسير يعمل بشكل صحيح، ستنتقل السيارة بسرعة ثابتة مقدارها 25 m/s بالنسبة إلى الرصيف. سيكون ذلك صحيحاً إذا كنت تسير على طريق مستقيم أو كنت تدور حول مستديرة ما أو إذا كنت تصعد باتجاه قمة تل أو تهبط لتمر بأسفل واد. يمكن التعبير عن السرعة بعدد بسيط، والاتجاه ليس هاماً. بالنتيجة السرعة كمية سُلّمية. دعنا نرمز في هذا البحث إلى السرعة بالحرف الصغير المائل v.

يمكن للسرعة أن تتغيّر طبعاً بتغيّر الزمن. لو دست على المكابح (الفرامل) لتجنب غزال يعبر الطريق، ستقوم بتخفيض السرعة بشكل مفاجئ. وبمجرد تجاوز الغزال، ستخفف سرعتك لتراه يثب إلى الحقل سليماً، وعندها ستزيد السرعة مرة أخرى.

يمكن اعتبار السرعة كمتوسط للمسافة عبر الزمن أو ككمية آنية. افترض في المثال التالي أنك تسير بسرعة 25 m/s ثم رأيت غزالاً، وبمجرد رؤيتك للغزال قمت بالدوس على المكابح، وخفّضت السرعة إلى الحد الأدنى البالغ 10 m/s، ثم راقبت الغزال وهو يهرب، وقمت بعدها بزيادة السرعة إلى 25 m/s مرة

أخرى، في مجال زمني مدته دقيقة. تكون السرعة المتوسطة عندها 17 m/s. ولكن تتغيّر سرعتك الآنية من لحظـــة إلى لحظة وتكون السرعة 17 m/sفي لحظتين فقط (الأولى لحظة تخفيض السرعة، والثانية لحظة زيادة السرعة).

كيفية تحديد السرعة

تُحدد سرعة سيارة أو شاحنة بواسطة عداد قياس السرعة نفسه الذي قاس المسافة. ولكن، بدلاً من عـــد عـــدد دورات العجلـــة من نقطة بداية معروفة، يعدُّ *عداد السرعة* عدد دورات العجلة في فترة زمنية معلومة. يمكن من خلال معرفة محيط العجلة تحويل عدد دورات العجلة في مجال زمني محدد مباشرة إلى متر بالثانية.

أنـــت تعلم بالطبع، بأن معظم عدادات السرعة تستجيب غالباً وبشكل مباشر لتغيّر السرعة. تقيس هـــذه الأجهـــزة معـــدل دوران جذع (محور العجلة) السيارة أو الشاحنة بطريقة أخرى، مشابهة للطريقة المـــستخدمة بواسطة *تاكومتر* (Tachometer) (جهاز يقيس عدد الدورات التي تدورها العجلة بالدقيقة أو rpm). يقـــيس مقـــياس حقيقي للسرعة في السيارة أو الشاحنة السرعة الآنية، وليس السرعة المتوسطة. في الحقـــيقة، إذا أردت أن تعرف السرعة المتوسطة التي تحركت بها أثناء فترة زمنية محددة، عليك قياس المسافة على عداد السرعة ثم تقسيمها على الزمن المنقضي.

ســـتُطبّق الصيغ التالية إذا انتقل جسم ما، لمدة زمنية معلومة t، مسافة ما طويلتها q بسرعة متوسطة v_{avg}. وهي أشكال للعلاقة ذاتها بين الكميات الثلاث.

$$q = v_{avg}t$$
$$v_{avg} = q/t$$
$$t = q/v_{avg}$$

مسألة (7-4)

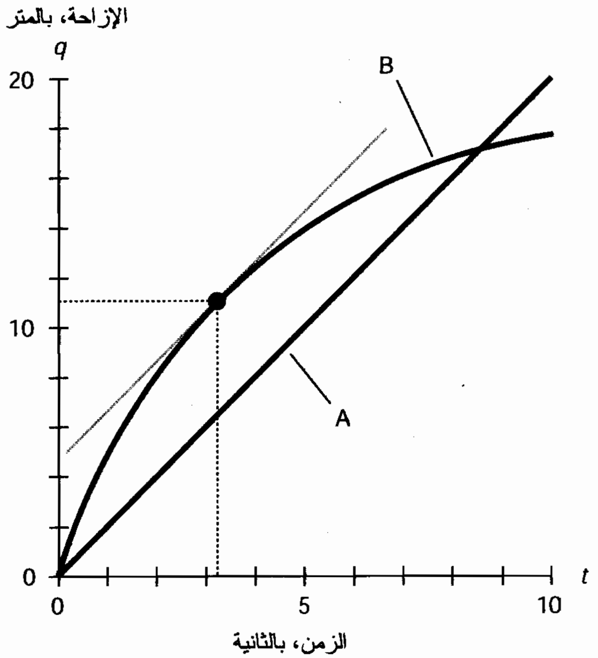
انظـــر إلى المنحنى في الشكل (7-5). المنحنى A عبارة عن خط مستقيم. ما هي السرعة الآنية V_{inst} في اللحظة $t = 5$ ثانية؟

حل (7-4)

الـــسرعة المرسومة على المنحنى A ثابتة؛ يمكنك معرفة ذلك لأن المنحنى عبارة عن خط مستقيم. لا يتغيّر عدد الأمتار بالثانية أثناء الفاصل الزمني الموضح. ينتقل الجسم في 10 ثوان مسافة 20 متراً؛ أي أن $20\ m/10\ s = 2\ m/s$. لذلك، تكون السرعة في اللحظة $t = 5s$ هي $v_{inst} = 2\ m/s$.

مسألة (7-5)

مـــا هي السرعة المتوسطة v_{avg} للجسم المُشار له بالمنحنى A في الشكل (7-5) في المجال الزمني من $t = 3s$ إلى $t = 7\ s$؟



الشكل (7-5): رسم توضيحي للمسائل من (7-4) إلى (7-8).

حل (7-5)

بما أن المنحنى عبارة عن خط مستقيم، فإن السرعة ثابتة؛ نعلم مسبقاً أنها 2 m/s. لذلك فإن السرعة المتوسطة، $v_{avg} = 2$ m/s بين أي نقطتين زمنيتين موضحتين في المنحنى.

مسألة (7-6)

افحـــص المــــنحنى B في الشكل (7-5). ماذا يمكننا أن نقول عن السرعة الآنية للجسم الذي تمت وصف حركته بواسطة هذا المنحنى.

حل (7-6)

يبدأ الجسم حركته بشكل سريع نسبياً، ثم تنخفض السرعة الآنية بمرور الزمن.

مسألة (7-7)

باســـتخدام التقــــريب البصري في المنحنى الموضح في الشكل (7-5). في أي لحظة زمنية t تكون السرعة الآنية v_{inst} للجسم الموضح بالمنحنى B مساوية إلى 2 m/s؟

حل (7-7)

خذ مسطرة وأوجد مستقيماً مماساً للمنحنى B بحيث يكون ميله مساوياً لميل المنحنى A. أي أوجد المستقيم الموازي للمستقيم A المماس بدوره للمنحنى B. ثم حدّد نقطة التماس على المنحنى B. أخيراً

ارسم من نقطة التماس خطاً مستقيماً باتجاه الأسفل، موازياً بدوره لمحور الإزاحة (q)، حتى يتقاطع مع محور الزمن (t). اقرأ القيمة على المحور t. في هذا المثال، تظهر $t = 3.2$ s تقريباً.

مسألة (7–8)

باستخدام التقريب البصري في المنحنى الموضح في الشكل (7–5). خذ بالاعتبار الجسم الذي تمت وصف حركته بواسطة المنحنى B. في اللحظة الزمنية t التي كانت السرعة الآنية v_{inst} مساوية 2 m/s، ما هي المسافة التي انتقلها الجسم؟

حل (7–8)

أوجد النقطة نفسها التي أوجدتها في المسألة (7–7)، من خلال إيجاد المستقيم الموازي للمستقيم A والمماس للمنحنى B. ارسم مستقيماً أفقياً باتجاه اليسار حتى يتقاطع مع محور الإزاحة (q). اقرأ القيمة على المحور q. يبدو في هذا المثال أن $q = 11$ m تقريباً.

شعاع السرعة

يتكون شعاع السرعة من مُركّبتين مستقلتين: *السرعة والاتجاه*. يمكن تحديد الاتجاه في البعد الواحد (وفق اتجاهين على خط مستقيم) أو في بعدين (في مستوى) أو في ثلاثة أبعاد (في الفضاء). ينخرط بعض الفيزيائيين في عبارات السرعة في فضاء أبعاده أكثر من ثلاثة أبعاد؛ إن ذلك خارج مجال هذا الكتاب.

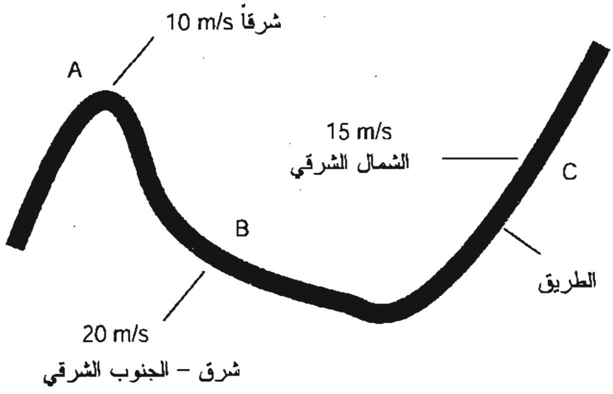
السرعة كشعاع

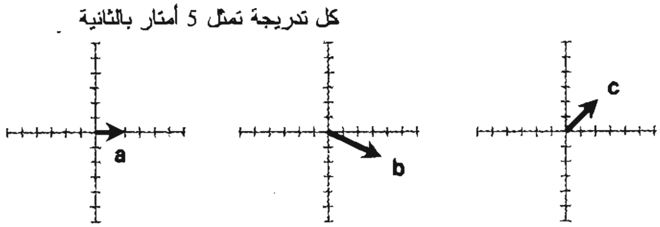
بما أن لشعاع السرعة مُركّبتي طويلة واتجاه، فهو كمية شعاعية. لا يمكن التعبير عن شعاع السرعة دون تحديد كلتا المركّبتين. كانت سرعة السيارة ثابتة في المثال السابق الذي كانت السيارة تسير فيه على طريق عام من مدينة إلى أخرى، ولكن كان شعاع سرعتها يتغيّر مع ذلك. إذا كنت تتحرك بسرعة 25 m/s ثم أردت المسير في طريق منحنٍ، فإن شعاع السرعة يتغيّر لأن الاتجاه يتغيّر.

يمكن تمثيل الأشعة رسومياً كقطع مستقيمة مع رؤوس أسهم. يشار إلى مُركّبة السرعة في شعاع السرعة بطول القطعة المستقيمة، ويُشار إلى الاتجاه بتوجيه السهم. يوضح الشكل (7–6) ثلاثة أشعة سرعة لسيارة تسير على طريق منحنٍ. تم توضيح ثلاث نقاط A، وB، وC. إن الأشعة الموافقة هي **a**، و**b**، و**c**. تتغيّر كل من السرعة والاتجاه مع الزمن.

كيفية تحديد شعاع السرعة

يمكن قياس شعاع السرعة باستخدام مقياس للسرعة مع استخدام بعض أنواع الأجهزة التي تشير للاتجاه الآني للانتقال. قد يتمّ ذلك في السيارة بواسطة وصلة مغنطيسية. ولكن في الحقيقة، لا يقدم مقياس السرعة والبوصلة القصة كاملة إذا لم تقد السيارة في مستوى أو مرج (سهب). يمكن بواسطة عداد السرعة والبوصلة في مدينة South Dakota تحديد شعاع السرعة الآنية لسيارتك، ولكن عندما تصل إلى مدينة Black Hills، عليك تضمين *كلينومتر* (Clinometers) (جهاز لقياس شدة الانحدار التي تهبطها أو تصعدها).





الشكل (7-6): أشعة السرعة **a**، و**b**، و**c** لسيارة في ثلاث نقاط (**A**، و**B**، و**C**) على الطريق.

يمكن الإشارة لمركّبات الاتجاه ثنائية الأبعاد بواسطة اتجاهات البوصلة (السمت) أو بواسطة الزوايا المقاسة بعكس عقارب الساعة لمحور يتجه "شرقاً". يُفضَّل النظام الأول من قبل المتجولين والبحارة، بينما يُفضَّل النظام الأخير من قبل الرياضيين والفيزيائيين النظريين. تساوي اتجاهات السمت في الشكل (7-6) للأشعة **a**، و**b**، و**c** تقريباً 90، و120، و45، درجة على التوالي. تكون هذه الزوايا في النموذج الرياضي حوالى 0، و30- (أو 330)، و45 درجة، على التوالي.

يتكون شعاع السرعة ثلاثي الأبعاد من مُركّبة طويلة وزاويتي اتجاه. تُستخدم زوايا الطول والعرض السماوية أو زوايا الصعود القائم والانحدار بشكل شائع للإشارة لاتجاهات أشعة السرعة.

التسارع

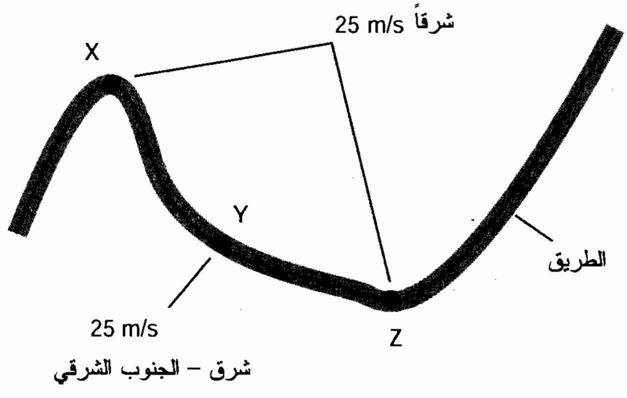
التسارع هو تعبير عن تغيّر شعاع سرعة جسم ما. يمكن أن يحدث التسارع عند حدوث تغيّر في السرعة أو تغيّر في الاتجاه أو تغيّر في كليهما. يمكن تحديد التسارع في البعد الواحد (على طول خط مستقيم) أو في بُعدين (في مستوى مسطح) أو في ثلاثة أبعاد (في الفضاء)، تماماً كشعاع السرعة. يحدث التسارع في بعض الأحيان باتجاه شعاع سرعة الجسم نفسه، ولكن ليس بالضرورة أن يحدث ذلك دائماً.

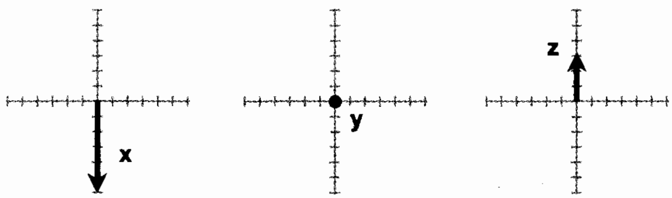
التسارع شعاع

إنّ التسارع كمية شعاعية. تُدعى طويلة شعاع التسارع في بعض الأحيان *بالتسارع*، ويُرمز لها بحرف صغير مائل مثل *a*. ولكن تقنياً، يجب استخدام عبارة التسارع؛ التي يُرمز لها بحروف صغيرة عريضة مثل **a**.

في مثال السيارة التي كانت تسير على طريق عام، افترض أن السرعة ثابتة وقيمتها 25 m/s (الشكل (7-7)). يتغيّر شعاع السرعة عندما تسير السيارة على طريق منحنٍ أو إذا صعدت السيارة أيضاً إلى قمة تل أو هبطت إلى أسفل وهد (على الرغم من عدم القدرة على رؤية ذلك في هذا الرسم ثنائي الأبعاد). إذا كانت السيارة تسير على طريق مستقيم وسرعتها تزداد، يشير شعاع التسارع إذاً إلى الاتجاه الذي تسير السيارة وفقه. لو دست على المكابح (الفرامل)، ستبقى السيارة تسير في مسار مستقيم، وسيشير التسارع إلى الاتجاه المعاكس لسير السيارة.

يمكن توضيح أشعة التسارع رسومياً كأسهم. يوضح الشكل (7-7)، ثلاثة أشعة تقريبية لتسارع سيارة تسير على طول طريق منحنٍ بسرعة ثابتة تساوي 25 m/s. يوجد ثلاث نقاط موضحة تدعى X، و Y، وZ. وأشعة التسارع الموافقة هي **x**، و**y**، و**z**. يحدث التسارع عندما تسير السيارة على طريق منحنٍ. إن الطريق مستقيم تماماً في النقطة *Y* وبالتالي يكون التسارع صفراً. وذلك موضح كنقطة في مبدأ مستوى الأشعة.





الشكل (7-7): أشعة التسارع **x**، و**y**، و**z** لسيارة في ثلاث نقاط (*x*، و*y*، و*z*) على الطريق.
لاحظ أن **y** هو الشعاع صفر لأنه لا يوجد أي تسارع في النقطة *y*.

كيفية تحديد التسارع

يجري التعبير عن طويلة شعاع التسارع بالمتر بالثانية، تدعى أيضاً *متر بالثانية مربع* (m/s^2). قد يبدو ذلـــك مُبهماً في البداية. ما هو *ثانية مربع*؟ فكر به من خلال مثال واقعي. افترض أن لديك سيارة تستطيع المسير بسرعة من 0 إلى 60 ميلاً بالساعة في 5 ثوان. تكافئ السرعة 60.0 mi/h تقريباً 26.8 m/s. افترض أن معدل التسارع ثابت من لحظة الإنطلاق بالسيارة حتى وصولك لسرعة 26.8 m/s في مستوى مستقيم. إذا يمكنك حساب طويلة التسارع:

$$a = (26.8\ \text{m/s})/(5\ \text{s}) = 5.36\ \text{m/s}^2$$

بالطـــبع، لن يكون التسارع الآني ثابتاً في الاختبار الحقيقي لإقلاع السيارة ومسيرها. ولكن، ستبقى طـــويلة التـــسارع المتوسط $5.36\ m/s^2$ – يزداد بمقدار 5 أمتار بالثانية بمرور كل ثانية – على افتراض أن السرعة تتغيّر من 0.00 إلى 60.0 mi/h في 5.00 s.

يمكـــن قـــياس طويلة التسارع الآني بدلالة القوة المطبقة على كتلة معروفة. يمكن تحديد ذلك بدلالة مقـــدار التـــشويه الحاصل في جسم مرن كالنابض. يمكن تعديل "مقياس القوة" الموضح في الشكل (7–4) لإنـــشاء "مقـــياس تـــسارع"، حيث يدعى هذا المقياس تقنياً *accelerometer*، ويستخدم لقياس طويلة التـــسارع. يجري تثبيت كتلة معلومة في الجهاز، ويجري تعيير مقياس الانحراف في بيئة المختبر. لكي يتمكن مقياس التسارع من العمل، يجب أن يكون اتجاه شعاع التسارع باتجاه محور النابض، ويجب أن يتجه شعاع التـــسارع من النهاية المثبتة خارجاً باتجاه الكتلة. سيؤدي ذلك لنشوء قوة معاكسة مباشرة للنابض. يوضح الشكل (7–8) مخططاً وظيفيّاً للمقياس الأساسي.

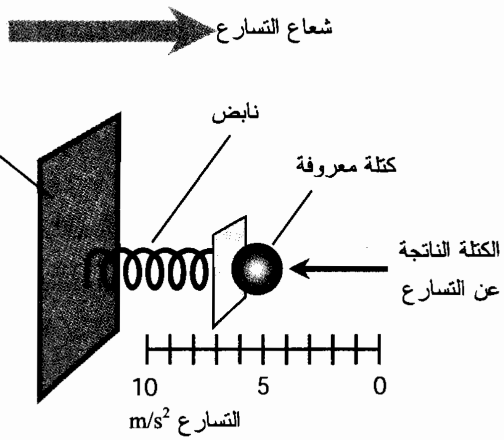
يمكـــن استخدام ميزان عام بنابض لقياس التسارع بشكل غير مباشر. عندما تقف على الميزان، فأنت تـــضغط النابض أو توازن مجموعة من الكتل على كفة الميزان. يقيس هذا الميزان القوة المتجهة للأسفل التي تطبقها كتلة جسمك على كفة الميزان كنتيجة لظاهرة تدعى *بظاهرة تسارع الجاذبية*. إن تأثير الجاذبية على الكـــتلة هـــو نفسه تأثير التسارع المتجه للأعلى والمساوي تقريباً $9.8\ m/s^2$. إن القوة، والكتلة، والتسارع مفاهيم مترابطة جداً كما سنرى قريباً.

لنفتـــرض أن جسماً ما يبدأ حركته من السكون ويتسارع بتسارع متوسط a_{avg} على خط مستقيم لفترة زمنية t. افترض أنه بعد هذه المدة كانت طويلة الإزاحة اعتباراً من نقطة البداية هي q. وبالتالي تُطبَّق هذه الصيغة:

$$q = a_{avg}\, t^2/2$$

افتـــرض في هذا المثال أن طويلة التسارع ثابتة؛ وسمِّها a. دعنا ندعو السرعة الآنية V_{inst} في الزمن t. وبالتالي ترتبط السرعة الآنية بطويلة التسارع كما يلي:

$$v_{inst} = at$$



الشكل (7–8): مقياس تسارع. يقيس هذا المقياس الطويلة فقط ويجب توجيهه بوضوح للتزويد بقراءة دقيقة.

مسألة (7–9)

لنفترض أن لدينا الجسمين المشار إليهما بالمنحنيات A وB في الشكل (7–9)، وأن هذين الجسمين يتسارعان على طول مسارين مستقيمين. ما هو التسارع الآني a_{inst} للجسم A في اللحظة $t = 4$ ثانية؟

حل (7–9)

التسارع المرسوم في المنحنى A ثابت لأن السرعة تزداد بمعدل ثابت مع الزمن. (وهذا سبب كون المنحنى خطاً مستقيماً). لا يتغيّر عدد المتر بالثانية مربع خلال المجال الزمني الموضح. يتسارع الجسم في عشر ثوان من 0 إلى 10 m/s؛ أي يزداد معدل السرعة متراً بالثانية بالثانية ($1\ \text{m/s}^2$). لذلك يكون التسارع في اللحظة $t = 4$ s هو $a_{\text{inst}} = 1\ \text{m/s}^2$.

مسألة (7–10)

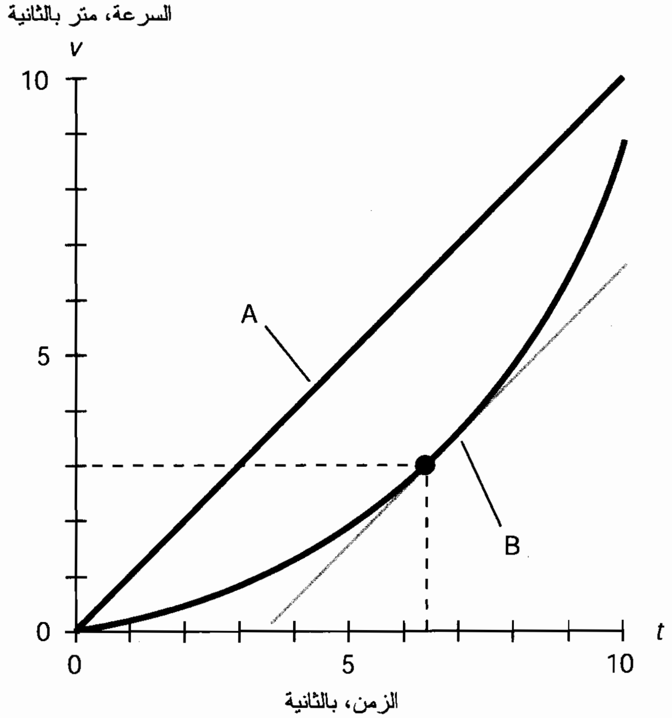
ما هو التسارع المتوسط a_{avg} للجسم المشار له بالمنحنى A في الشكل (7–9) في المجال الزمني من $t = 2$ s إلى $t = 8$ s؟

حل (7–10)

التسارع ثابت لأن المنحنى خط مستقيم؛ نعلم مسبقاً أنه يساوي $1\ \text{m/s}^2$ وبالتالي يكون $a_{\text{avg}} = 1\ \text{m/s}^2$ بين نقطتين زمنيتين موضحتين في المنحنى.

مسألة (7–11)

بفحص المنحنى B في الشكل (7–9). ماذا يمكن أن نقول عن التسارع الآني لجسم حركته مشروحة بهذا المنحنى؟



الشكل (7-9): رسم توضيحي للمسائل من (7-9) إلى (7-13).

حل (7-11)

يبدأ الجسم بالتسارع ببطء، وبمرور الزمن، يزداد معدل تسارعه الآني.

مسألة (7-12)

باستخدام التقريب البصري في المنحنى في الشكل (7-9). في أي زمن t يكون التسارع الآني a_{inst} للجسم الموصوف في المنحنى B مساوياً إلى $1\ \text{m/s}^2$؟

حل (7-12)

أوجد باستخدام المسطرة المستقيم المماس للمنحنى B والذي يكون ميله مساوياً لميل المنحنى A. ثم حدّد نقطة التماس على المنحنى B. أخيراً، ارسم خطاً مستقيماً باتجاه الأسفل، موازياً لمحور السرعة (v)، حتى يتقاطع مع محور الزمن (t). اقرأ القيمة على المحور t. فتظهر $t = 6.3\ \text{s}$ تقريباً.

مسألة (7-13)

باستخدام التقريب البصري في المنحنى في الشكل (7-9). وبأخذ حركة الجسم الموضحة بواسطة المنحنى B بالاعتبار. ما هي السرعة الآنية v_{inst} للجسم في اللحظة الزمنية t عندما يكون التسارع الآني a_{inst} مساوياً $1\ \text{m/s}$.

حل (7-13)

حـــدِّد النقطة نفسها التي وجدتها في المسألة (7-12) أي نقطة تماس المنحنى B الواقعة على المستقيم المـــوازي للمنحنى A. ارسم باتجاه اليسار خطاً أفقياً حتى يتقاطع مع محور السرعة (v). اقرأ القيمة على المحور v. تبدو في هذا المثال وكأنها حوالى $v_{\text{inst}} = 3.0$ m/s.

قوانين نيوتن في الحركة

تُطبَّق ثلاثة قوانين على حركات الأجسام في الفيزياء الكلاسيكية، وهذه القوانين منسوبة إلى الفيزيائي والفلكي والرياضي اسحق نيوتن. لا تأخذ هذه القوانين في اعتبارها التأثيرات النسبية التي تصبح هامة عندما تقترب السرعات من سرعة الضوء، أو عند وجود حقول جاذبية ضخمة.

قانون نيوتن الأول

لهـــذا القانون حالتان: (1) إذا كان الجسم في حالة سكون، ولم يتعرض لقوة خارجية، فإنه يبقى في حالـــة سكون؛ (2) إذا كان الجسم يتحرك بسرعة منتظمة، ولم يتعرض لقوة خارجية، فإنه يستمر بالحركة بهذه السرعة.

قانون نيوتن الثاني

إذا تعـــرض جـــسم مـــا كتلته m (بالكيلوغرام) لقوة طويلتها F (بالنيوتن)، فإنه يمكن إيجاد طويلة التسارع a (بالمتر بالثانية مربع) وفقاً للصيغة التالية:

$$a = F/m$$

الإصدار الأكثر ألفة لهذه الصيغة هو

$$F = ma$$

عند تحديد القوة والتسارع ككميات شعاعية، تصبح الصيغة

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

قانون نيوتن الثالث

لكـــل فعـــل رد فعل يساويه في المقدار ويعاكسه في الاتجاه. بكلمات أخرى، إذا أثر جسم A بقوة شعاعها $\mathbf{F}$ على جسم B، فإن الجسم B سيؤثر على الجسم A بقوة شعاعها $-\mathbf{F}$ (معاكسة للقوة F).

مسألة (7-14)

تتعـــرض ســـفينة فـــضائية كتلتها $m = 10{,}500\ (1.0500 \times 10^4)$ kg وموجودة في الفضاء بين الكواكب لقوة شعاعها $\mathbf{F} = 100{,}000\ (1.0000 \times 10^5)$ N يتجه باتجاه نجمة الشمال. حدّد طويلة واتجاه شعاع التسارع.

حل (7-14)

اســتخدم الصيغة الأولى المذكورة سابقاً في قانون نيوتن الثاني. بتعويض الأعداد في طويلة القوة F وتعويض قيمة الكتلة m نحصل على طويلة التسارع:

$$a = F/m$$
$$= 1.0000 \times 10^5/1.0500 \times 10^4$$
$$= 9.5238\ m/s^2$$

يكون اتجاه شعاع التسارع **a** في هذه الحالة هو نفسه اتجاه شعاع القوة **F**، أي باتجاه نجمة الشمال. قـد تلاحظ أن هذا التسارع أصغر بقليل من تسارع الجاذبية على سطح الأرض، والذي يساوي $9.8\ m/s^2$. لذلك، سيشعر الشخص داخل هذه المركبة الفضائية وكأنه في بيته؛ يوجد حقل جاذبية صناعي بنفس قوة حقل الجاذبية الأرضي.

مسألة (7-5)

وفقاً لقانون نيوتن الأول، ألا يجب أن ينطلق القمر بخط مستقيم في الفضاء بين النجوم؟ لماذا يدور حول الأرض؟

حل (7-5)

يتعـرض القمر باستمرار لقوة يحاول شعاعها شدّه للأرض. تتوازن هذه القوة مع عطالة القمر التي تحـاول الانطلاق به وفق خط مستقيم. سرعة القمر حول الأرض ثابتة تقريباً، ولكن يتغيّر شعاع سرعة القمر دائماً بسبب القوة التي يتعرض لها نتيجة التجاذب بين القمر والأرض.

امتحان موجز

عـد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت على ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. واحد نيوتن يكافئ
   (a) واحد كيلوغرام متر.
   (b) واحد كيلوغرام متر بالثانية.
   (c) واحد كيلوغرام متر بالثانية مربع.
   (d) واحد متر بالثانية مربع.
2. تتحـرك كتلة قيمتها 19 kg بسرعة ثابتة مقدارها 1.0 m/s بالنسبة لمراقب. ما هي طويلة شعاع قوة تلك الكتلة من نقطة مراقبة المراقب؟ افترض أن الكتلة تتحرك على خط مستقيم.
   (a) 19 نيوتن.

(b) 0.053 نيوتن.

(c) 1 نيوتن.

(d) 0 نيوتن.

3. لشعاع السرعة مُركّبات

(a) طويلة واتجاه.

(b) سرعة وكتلة.

(c) زمن وكتلة.

(d) سرعة وزمن.

4. يساوي تسارع الجاذبية الأرضية، بالقرب من السطح، $9.81\ m/s^2$. لو أُسقط حجر طوب كتلته 3.00 kg من ارتفاع عالٍ، ما هي المسافة التي سيقطعها في 2.00 s؟

(a) 6.00 m.

(b) 29.4 m.

(c) 19.6 m.

(d) 58.8 m.

5. افترض أن كتلة حجر الطوب في السؤال 4 تساوي 1.00 kg فقط. ما هي المسافة التي سيقطعها حجر الطوب في 2.00 s؟

(a) 2.00 m.

(b) 19.6 m.

(c) 29.4 m.

(d) 9.8 m.

6. ماذا يحدث لو توقفت جاذبية الأرض للقمر فجأةً؟

(a) لا شيء.

(b) سيتوقف القمر عن الدوران حول الأرض.

(c) سيسقط القمر على الأرض.

(d) سيسقط القمر على الشمس.

7. يتكون شعاع الكتلة من

(a) وزن واتجاه.

(b) وزن وسرعة.

(c) وزن وزمن.

(d) لا يوجد شيء كهذا؛ الكتلة ليست مقداراً شعاعياً.

8. تقوم بإرساء قارب صغير. وأثناء اقترابك من رصيف الميناء، قفزت من القارب. لقد قصّرت عن بلوغ رصيف الميناء وسقطت في الماء لأن القارب تراجع للخلف عندما قفزت للأمام. يخضع ذلك إلى

(a) قانون نيوتن الأول.

(b) قانون نيوتن الثاني.

(c) قانون نيوتن الثالث.

(d) حقيقة أن الوزن ليس كتلة.

9. في فضاء ثلاثي الأبعاد، يمكن وصف اتجاه الشعاع بدلالة

(a) زوايا الصعود القائم وزوايا الانحراف.

(b) المسافة والسرعة.

(c) الزمن والمسافة.

(d) طوله.

10. أثناء القيادة في مستوى مُسطّح، ارتطمت بحجارة طوب أثناء القيادة على طريق مستقيم. يتجه شعاع التسارع

(a) باتجاه السيارة المتحركة.

(b) بعكس اتجاه حركة السيارة المتحركة.

(c) وفق زاوية عامودية على اتجاه حركة السيارة.

(d) غير موجود، إنه صفر.

الفصل 8

كمية الحركة، والعمل، والطاقة، والاستطاعة

يصف الميكانيك الكلاسيكي سلوك الأجسام المتحركة. لكل كتلة متحركة *كمية حركة وطاقة*. عند اصطدام جسمين، تتغيّر كمية الحركة والطاقة المحتواة في كل جسم. سنتابع في هذا الفصل دراسة الفيزياء النيوتنية الأساسية.

كمية الحركة

كمية الحركة هي كتلة الجسم مضروبة بسرعته. الوحدة القياسية للكتلة هي الكيلوغرام (kg)، والوحدة القياسية للسرعة هي متر بالثانية (m/s). يجري التعبير عن طويلة كمية الحركة بالكيلوغرام – متر بالثانية (kg.m/s). إذا ازدادت كتلة جسم ما يتحرك بسرعة محددة بعامل مقداره 5، فإن كمية الحركة تزداد بعامل مقداره 5، وذلك على افتراض بقاء السرعة ثابتة. إذا ازدادت السرعة بعامل مقداره 5 مع بقاء الكتلة ثابتة، فإن كمية الحركة تزداد أيضاً بعامل مقداره 5.

كمية الحركة كشعاع

افترض أن سرعة جسم ما v (بالمتر بالثانية)، وأن كتلة ذلك الجسم m (بالكيلوغرام). وبالتالي فإن طويلة كمية الحركة p هي حاصل ضربهما:

$$p = mv$$

لا يمثل ذلك القصة كاملة. لوصف كمية الحركة بشكل كامل، يجب تحديد الاتجاه وتحديد الطويلة. وهذا يعني أنه علينا أن نأخذ بالاعتبار شعاع سرعة الكتلة بدلالة السرعة والاتجاه. (إن كمية حركة حجر طوب كتلته 2-kg يطير عبر نافذتك الشرقية مختلفة عن كمية حركة حجر طوب كتلته 2-kg يطير عبر

نافذتك الشمالية). لندع $\mathbf{v}$ تُمثّل شعاع السرعة، و$\mathbf{p}$ تُمثّل شعاع كمية الحركة، يمكننا أن نقول

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

الدفع

يمكن أن تتغيّر كمية حركة جسم متحرك وفق إحدى الطرق الثلاث:

- تغيّر كتلة الجسم
- تغيّر سرعة الجسم
- تغيّر في اتجاه حركة الجسم

دعنا نجمع الاحتمال الثاني والثالث مع بعضهما؛ وبالتالي سيصبح تغيّراً في شعاع السرعة.

تخــيل كتلة ما، مثل سفينة فضاء، تسير في مسار مستقيم في الفضاء بين الكواكب. لنأخذ بالاعتبار نقطــة مــراقبة أو *إطار مرجعي*، بحيث نستطيع التعبير عن شعاع سرعة السفينة بشعاع مختلف عن الصفر ويــتجه باتجاه محدد. يمكن تطبيق قوة $\mathbf{F}$ على هذه السفينة بإطلاق المحرك الصاروخي. تخيل أنه يوجد عدة محركات في سفينة الفضاء، بحيث إنّ أحد هذه المحركات موجه لقيادة المركبة للأمام بسرعة متزايدة، وبقية المحركات قادرة على تغيير اتجاه المركبة. إذا جرى إطلاق المحرك لمدة t ثانية بقوة شعاعها $\mathbf{F}$ نيوتن (كما هو موضــح في الأمــثلة الثلاثة في الشكل (8-1))، إذاً سيدعى حاصل الضرب $\mathbf{F}t$ عندها بالدفع. الدفع هو شعاع، ويُرمز له بالحرف العريض الكبير $\mathbf{I}$، ويُعبَّر عنه بالكيلوغرام متر بالثانية (kg.m/s):

$$\mathbf{I} = \mathbf{F}t$$

يُولّد الدفع تغيّراً في شعاع السرعة. إن ذلك واضح بشكل كاف؛ إنه هدف المحركات الصاروخية في سفينة الفضاء! تذكر الصيغة الواردة في الفصل السابع والمتعلقة بالكتلة m، والقوة $\mathbf{F}$، والتسارع $\mathbf{a}$:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

بتعويض $m\mathbf{a}$ في $\mathbf{F}$ في معادلة الدفع. نحصل على:

$$\mathbf{I} = (m\mathbf{a})t$$

تذكر الآن أن التسارع هو تغيّر شعاع السرعة بوحدة الزمن. افترض أن شعاع سرعة سفينة الفضاء $\mathbf{v}_1$ قبل انطلاق الصاروخ، و$\mathbf{v}_2$ بعد انطلاقه. ثم افترض أن المحرك الصاروخي يولد قوة ثابتة عند إطلاقه،

$$\mathbf{a} = (\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1)/t$$

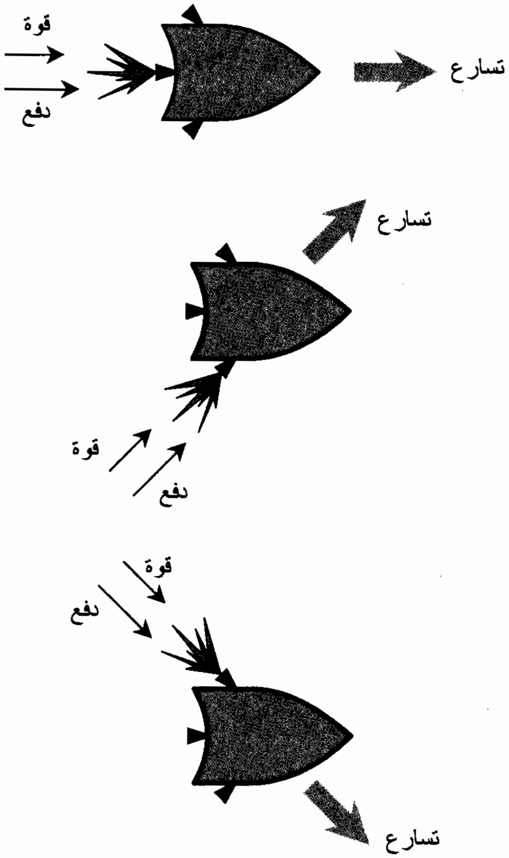
يمكن أن نعوض هذه القيمة في المعادلة السابقة لنحصل على

$$\mathbf{I} = m[(\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1)/t]t = m\mathbf{v}_2 - m\mathbf{v}_1$$

وهذا يعني أن الدفع مساوٍ لتغيّر كمية الحركة.

لقــد اشتققنا قانوناً هاماً في الفيزياء النيوتونية. يُعبَّر عن الدفع عند التعبير عنه بوحدات SI الأساسية بالكيلوغرام-متر بالثانية (kg.m/s)، وكأنه كمية حركة. يمكنك أن تفكر بالدفع على أنه شكل آخر لكمية

الحركة. عند تعريض جسم ما للدفع، يتغيّر شعاع كمية الحرارة **p**. يمكن أن تصبح طويلة الشعاع **p** أكبر أو أصغر، ويمكن أن يتغيّر الاتجاه أو يمكن أن يحدث كل من الأمرين.



الشكل (8-1): ثلاث طرق مختلفة يمكن أن يسبب الدفع من خلال تسارع الجسم (الجسم في هذه الحالة، سفينة فضاء).

مسألة (8-1)

افترض أن جسما كتلته 2.0 kg يتحرك بسرعة ثابتة 50 m/s باتجاه الشمال. يؤثر على هذا الجسم دفع يتجه جنوباً فيبطئ حركة الكتلة إلى 25 m/s، ولكن تستمر الكتلة بالتحرك شمالاً. ما هو الدفع المسؤول عن هذا التغيّر في كمية الحركة؟

حل (8-1)

إن كمية الحركة الأصلية $\mathbf{p}_1$ هي حاصل ضرب الكتلة بشعاع السرعة الابتدائية:

$$\mathbf{p}_1 = 2.0 \text{ kg} \times 50 \text{ m/s} = 100 \text{ kg.m/s}$$

باتجاه الشمال. كمية الحركة $\mathbf{p}_2$ هي حاصل ضرب الكتلة بشعاع السرعة النهائية:

$$\mathbf{p}_2 = 2.0\ \text{kg} \times 25\ \text{m/s} = 50\ \text{kg.m/s}$$

باتجاه الشمال. بالنتيجة يكون التغيّر في كمية الحركة $\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1$:

$$\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1 = 50\ \text{kg.m/s} - 100\ \text{kg.m/s} = -50\ \text{kg.m/s}$$

باتجـــاه الشمال. وهذه القيمة تساوي دفعاً قيمته 50 kg.m/s باتجاه الجنوب. بما أن الدفع هو نفسه التغيّر في كمية الحركة، بالنتيجة فإن قيمة الدفع تساوي 50 kg.m/s باتجاه الجنوب.

لا تدع هذه النتيجة تربكك. إن الشعاع ذا الطويلة x- باتجاه مُعيَّن هو نفسه الشعاع بطويلة x في الاتجـــاه المعاكس. ستحصل في بعض المسائل التي تقوم بحلها على طويلة سالبة. عند حدوث هذا، اعكس الاتجاه فقط ثم خذ القيمة المطلقة للطويلة.

الإصطدام

عـــندما يرتطم جسمان ببعضهما البعض لأنهما في حركة نسبية بالنسبة لبعضهما، وتتقاطع مساراتهما في الوقت المناسب يحدث الإصطدام.

مصونية كمية الحركة

استناداً إلى *قانون مصونية كمية الحركة*، فإن كمية الحركة الكلية للجسمين قبل الإصطدام هي نفسها كمـــية الحركة بعد الإصطدام. لا تتغيّر خصائص الإصطدام إذا كان *النظام مثالياً*. لا يوجد في النظام المثالي احتكاك أو نواقص العالم الحقيقي الأخرى، ولا تتغيّر كمية الحركة الكلية للنظام إذا لم تتدخل كتلة أو قوة جديدة.

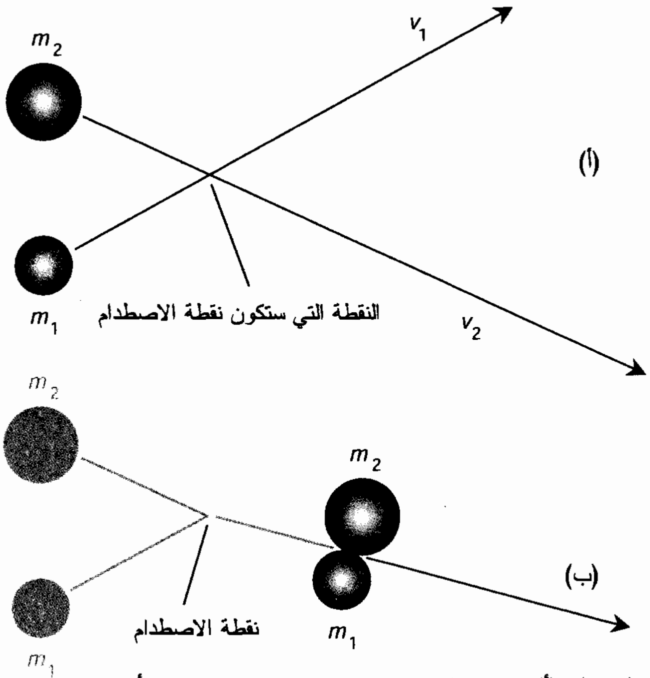
لا يُطـــبَّق قانون مصونية كمية الحركة على النظم التي تحوي جسمين أو تحوي نقاط مادية فقط بل يُطـــبَّق أيضاً على النظم التي تحوي أي عدد من الأجسام أو النقاط المادية. ولكن يُستخدم القانون في *النظام المغلق*، أي النظام الذي تبقى الكتلة الكلية فيه ثابتة، ولا تتدخل قوى من خارج النظام.

إنه الوقت المناسب لإعلان هام. من الآن فصاعداً في هذا الكتاب، إذا لم تُحدَد الوحدات فافترض أنها محـــددة وفـــق النظام الدولي (SI). لذلك، ستكون الكتل في الأمثلة اللاحقة بالكيلوغرام، وطويلة شعاع الـــسرعة بالمتـــر بالثانية، وكميات الحركة بالكيلوغرام بالثانية. تعوّد على اعتماد هذا الافتراض، إذا كانت الـــوحدات النهائية هامة في النقاش أولاً. بالطبع، إذا جرى تحديد وحدات أخرى، استخدمها. ولكن كن حـــذراً عند إجراء الحسابات. يجب أن تكون الوحدات متوافقة دائماً مع الحساب أو سنحصل على نتيجة غير دقيقة أو على نتيجة ليس لها معنى.

الأجسام اللزجة

انظر إلى الشكل (8-2). إنّ للجسمين الكتلتين m_1وm_2، ويتحركان بالسرعتين v_1 وv_2، على التوالي. إن

شعاعي السرعة $\mathbf{v}_1$ و$\mathbf{v}_2$ غير موضحين هنا، ولكنهما يتجهان باتجاهات موضحة بالأسهم. يكون الجسمان في حالة اصطدام في القسم (أ) في هذا المثال التوضيحي. إن كمية الحركة للجسم الذي كتلته m_1 تساوي $\mathbf{p}_1 = m_1\mathbf{v}_1$؛ وكمية الحركة للجسم الذي كتلته m_2 تساوي $\mathbf{p}_2 = m_2\mathbf{v}_2$.



الشكل (8-2): (أ) جسمان لزجان، لكل منهما كتلة ثابتة ولكن أشعة السرعة مختلفة، وهما يقتربان من بعضهما. (ب) الجسمان بعد الاصطدام.

في القسم (ب)، اصطدم الجسمان ببعضهما والتصقا معاً. بعدم الإصطدام، يسير الجسم المركب بشعاع سرعة جديد $\mathbf{v}$ يختلف عن أي من أشعة السرعة الابتدائية. تُدعى $\mathbf{p}$ كمية الحركة الجديدة، وهي تساوي إلى مجموع كميات الحركة الأصلية. لذلك:

$$\mathbf{p} = m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2$$

يمكن تحديد شعاع السرعة النهائي $\mathbf{v}$ بجعل الكتلة النهائية $m_1 + m_2$. لذلك:

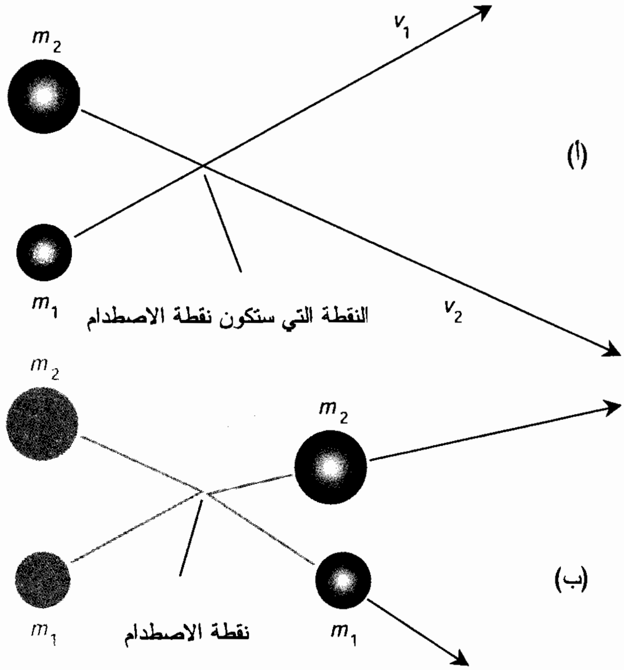
$$\mathbf{p} = (m_1 + m_2)\mathbf{v}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{p}/(m_1 + m_2)$$

الأجسام المرتدة

دقّق الآن في الشكل (8-3). إنّ للجسمين الكتلتين m_1 وm_2، ويتحركان بالسرعتين v_1 وv_2، على التوالي. إن شعاعي السرعة $\mathbf{v}_1$ و$\mathbf{v}_2$ غير موضحين هنا، ولكنهما يتجهان وفق الاتجاهات الموضحة بالأسهم.

يكــون الجسمان في حالة اصطدام في القسم (أ) من هذا المثال التوضيحي. إن كمية الحركة للجسم الذي كتلــته m_1 تساوي $\mathbf{p}_1 = m_1\mathbf{v}_1$؛ وكمية الحركة للجسم الذي كتلته m_2 تساوي إلى $\mathbf{p}_2 = m_2\mathbf{v}_2$. وبالتالي سيمثّل ذلك حالة الشكل (8-2) نفسها. ولكن الأجسام هنا مصنوعة من مواد مختلفة. إنها ترتد عن بعضها عند الاصطدام.



الشكل (8-3): (أ) جسمان مرتدان، لكل منهما كتلة ثابتة ولكن أشعة السرعة مختلفة، وهما يقتربان من بعضهما. (ب) الجسمان بعد الاصطدام.

اصطدم الجسمان ببعضهما في القسم (ب)، وارتدا عن بعضهما. لم تتغيّر كتلتاهما بالطبع، ولكن تغيّر شــعاعا السرعة، وبالتالي تغيرت كل من كميتي الحركة. ولكن، كمية الحركة الكلية لم تتغير، وفقاً لقانون مصونية كمية الحركة.

افتــرض أن شــعاع السرعة الجديد للكتلة m_1 هو $\mathbf{v}_{1a}$ وشعاع السرعة الجديد للكتلة m_2 هو $\mathbf{v}_{2a}$. وبالتالي تكون كميات الحركة الجديدة للأجسام

$$\mathbf{p}_{1a} = m_1\mathbf{v}_{1a}$$

$$\mathbf{p}_{2a} = m_2\mathbf{v}_{2a}$$

وفقاً لقانون مصونية كمية الحركة،

$$\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_{1a} + \mathbf{p}_{2a}$$

ولذلك

$$m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2 = m_1\mathbf{v}_{1a} + m_2\mathbf{v}_{2a}$$

تُشكِّل الأمثلة الموضحة في الأشكال (8–2) و(8–3) حالات مثالية. نتجاهل في العالم الحقيقي التعقيدات الموجودة هنا بغية برهنة المبادئ الأساسية. مثلاً، ربما تساءلت مسبقاً فيما إذا كانت عمليات الاصطدام الموضحة في هذه الأشكال تؤدي إلى دوران أو فتل الكتلة المُركَّبة (في الشكل (8–2)) أو كل من أو كلتا الكتلتين (في الشكل (8–3)). سيحدث ذلك في العالم الحقيقي، وسيجعل حساباتنا معقدة بشكل كبير. افترضنا أن هذه الأمثلة مثالية وأنه لا يجري دوران أو فتل في عمليات الاصطدام.

مسألة (8–2)

افترض أنه لديك لعبة مُكوَّنة من قطارين كهربائيين مُعدَّين للسير على سكة مستقيمة تمتد شرقاً–غرباً. للقطار *A* كتلة تبلغ 1.60 kg ويتحرك شرقاً بسرعة 0.250 m/s. للقطار *B* كتلة تبلغ 2.50 kg ويتحرك غرباً بسرعة 0.500 m/s. يوجد في مقدمة القطارين لوحات لزجة في مقدمة محركاهما بحيث لا يؤدي اصطدامهما ببعضهما إلى ارتدادهما. القطاران مُعدَّان للاصطدام. افترض أن الاحتكاك معدوم على محاور العجلات، وافترض أنك قمت في لحظة الاصطدام بفصل القدرة عن المحركات. ما هي سرعة واتجاه القطار المُركَّب بعد الاصطدام؟ افترض عدم خروج أي قطار عن سكته.

حل (8–2)

أولاً، احسب كمية حركة كل قطار. سمِّ كتلتي القطارات m_a وm_b على التوالي. دعنا نعتبر أن اتجاه الشرق موجب والغرب سالب. (نستطيع افتراض ذلك لأنهما يعاكسان بعضهما البعض على طول السكة). دعنا نُمثِّل شعاع سرعة القطار *A* بالرمز $\mathbf{v}_a$ وشعاع سرعةالقطار *B* بالرمز $\mathbf{v}_b$.

وبما أن $m_a = 1.60$ kg، و$m_b = 2.50$ kg، و$\mathbf{v}_a = +0.250$ m/s، و$\mathbf{v}_b = -0.500$ m/s. تكون كميتا الحركة على التوالي

$$\mathbf{p}_a = m_a\mathbf{v}_a = (1.60 \text{ kg})(+0.250 \text{ m/s}) = +0.400 \text{ kg.m/s}$$

$$\mathbf{p}_b = m_b\mathbf{v}_b = (2.50 \text{ kg})(-0.500 \text{ m/s}) = -1.25 \text{ kg.m/s}$$

لذلك يكون المجموع الكلي لكميتي الحركة

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_a + \mathbf{p}_b = +0.400 \text{ kg.m/s} + (-1.25 \text{ kg. m/s})$$
$$= -0.850 \text{ kg.m/s}$$

تتكون الكتلة m للقطار المُركّب ببساطة من مجموع كتلي القطارين *A* و*B*، والتي تبقى نفسها أثناء عملية الاصطدام العنيفة:

$$m = m_a + m_b = 1.60 \text{ kg} + 2.50 \text{ kg} = 4.10 \text{ kg}$$

دعنا نشير لشعاع السرعة النهائية والذي نحاول إيجاده بالحرف $\mathbf{v}$. نعلم أن كمية الحركة مُصانة في عملية الاصطدام ، لأن الاصطدام هو اصطدام مثالي. لذلك، يكون شعاع السرعة النهائية مساوياً

لكمية الحركة **p** مقسومة على الكتلة النهائية m:

$$\mathbf{v} = \mathbf{p}/m = (-0.850 \text{ kg. m/s})/ (4.10 \text{ kg})$$
$$\approx -0.207 \text{ m/s}$$

وهذا يعني أن "القطار" المُركَّب، سيتحرك بعد الاصطدام باتجاه الغرب بسرعة 0.207 m/s.

مادتان جديرتان جداً بالملاحظة

هناك أمران يجب ذكرهما قبل المتابعة. الأول، جرى حتى الآن تضمين الوحدات الحسابات وذلك لأهداف توضيحية. يمكن ضرب الوحدات وقسمتها كالأعداد. مثلاً، تقسيم 0.850 kg.m/s على 4.10 kg يؤدي إلى اختصار الكيلوغرام من النتيجة النهائية مما يؤدي إلى متر بالثانية (m/s). إنها لفكرة جيدة أن تُبقي على الوحدات في الحسابات، على الأقل حتى تتعود عليها، وبالتالي يمكنك التأكد من أن الوحدات في النتيجة النهائية لها معنى. لو حصلنا ولنقل على كيلوغرام – متر (kg.m) في النتيجة النهائية للمسألة (8–2)، سنعلم أن هناك أمراً ما خطأ لأن كيلوغرام – متر ليس وحدة من وحدات السرعة أو وحدة لطويلة شعاع السرعة.

الأمـــر الثاني الذي يجب أن تعرفه هو أن عمليات ضرب وقسمة الكميات الشعاعية صحيحة تماماً، كــضرب كمـــية الحركة أو شعاع السرعة، بكميات سُلّمية، كالكتلة. ستكون النتيجة دائماً شعاعاً آخر. مثلاً، عندما قمنا بحل المسألة (8–2)، قسّمنا كمية الحركة (شعاع) على الكتلة (مقدار سُلّمي). ولكن، لا يمكـــن جمع مقدار شعاعي إلى مقدار سُلّمي، أو طرح مقدار سُلّمي من مقدار شعاعي. ولا يمكننا أيضاً أن نـــضرب شـــعاعين ونـــتوقع أن نحصل على جواب ذي معنى إذا لم نُحدد هل سنستخدم الضرب النقطي (السُلّمي) أو الضرب الشعاعي (المتصالب). يجب أن تتعود على هذا الشكل من الرياضيات الذي يُدرّس في الصفوف الثانوية. إذا لم تكن هذه المفاهيم مألوفة بالنسبة لك، عُد إلى الباب صفر من هذا الكتاب لمراجعة موضوع الأشعة. يمكن إيجاد هذا الموضوع في القسم الأخير من الفصل الأول.

مسألة (8–3)

افترض أنه لديك لعبة مُكوَّنة من قطارين كهربائيين جرى إعدادهما كما في المسألة (8–2). القطار A كتلـــته 2.00 kg ويتحرك شرقاً بسرعة 0.250 m/s. القطار B كتلته 1.00 kg ويتحرك غرباً بـــسرعة 0.500 m/s. ما هي سرعة واتجاه القطار المُركَّب بعد الاصطدام؟ افترض أنه لا يخرج أي قطار عن سكته.

حل (8–3)

سمِّ كتلتي القطارين m_a وm_b على التوالي. دعنا نعتبر أن اتجاه الشرق موجب واتجاه الغرب سالب. دعنا ندعو أشعة السرعة $\mathbf{v}_a$ و$\mathbf{v}_b$. وبما أن $m_a = 2.00$ kg، و$m_b = 1.00$ kg، $\mathbf{v}_a = +0.250$ m/s، و$\mathbf{v}_b = -0.500$ m/s. تكون كميتا الحركة على التوالي

$$\mathbf{p}_a = m_a\mathbf{v}_a = (2.00 \text{ kg}) (+0.250 \text{ m/s}) = +0.500 \text{ kg. m/s}$$

$$\mathbf{p}_b = m_b\mathbf{v}_b = (1.00 \text{ kg}) (-0.500 \text{ m/s}) = -0.500 \text{ kg. m/s}$$

إذاً المجموع الكلي لكميتي الحركة

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_a + \mathbf{p}_b = +0.500 \text{ kg. m/s} + (-0.500 \text{ kg. m/s})$$
$$= 0 \text{ kg. m/s}$$

إن كتلة القطار المُركَّب m ببساطة هي مجموع كتلتي القطار A والقطار B، لا شيء يتغير:

$$m = m_a + m_b = 2.00 \text{ kg} + 1.00 \text{ kg} = 3.00 \text{ kg}$$

شعاع السرعة النهائية $\mathbf{v}$ يساوي كمية الحركة الكلية $\mathbf{p}$ مقسومة على الكتلة النهائية m:

$$\mathbf{v} = \mathbf{p}/m = (0 \text{ kg. m/s})/(3.00 \text{ kg})$$
$$= 0 \text{ m/s}$$

وهـــذا يعـــني أن القطـــار المُركَّب يصبح بعد الاصطدام في حالة سكون. قد يبدو ذلك في البداية مـــستحيلاً. إذا كانت كمية الحركة مُصانة، كيف يمكن أن تكون صفراً بعد الاصطدام؟ أين ذهبت كلها؟ إن الجـــواب علـــى هـــذا السؤال هو أن كمية الحركة الكلية لهذا النظام صفر قبل الاصطدام وكذلك بعد الاصطدام. تذكر أن كمية الحركة مقدار شعاعي. انظر إلى المعادلات السابقة مرة أخرى:

$$\mathbf{p}_a = m_a\mathbf{v}_a = (2.00 \text{ kg})(+0.250 \text{ m/s}) = +0.500 \text{ kg.m/s}$$
$$\mathbf{p}_b = m_b\mathbf{v}_b = (1.00 \text{ kg})(-0.500 \text{ m/s}) = -0.500 \text{ kg.m/s}$$

إن طويلتي كميتي الحركة للقطارين متساويتان ولكن متعاكستان في الاتجاه. بالنتيجة المجموع الشعاعي قبل الاصطدام يساوي صفراً.

العمل

العمـــل في الفيـــزياء هـــو تطبيق قوة محددة على جسم لمسافة محددة. الأمثلة الأكثر شيوعاً هي رفع الأجـــسام ذات الكـــتلة الكبيرة ("أوزان" أو "كتل") مباشرة بشكل يعاكس قوة الجاذبية. إن كمية العمل المُنجَز w من خلال تطبيق قوة طويلتها F لمسافة q هي

$$\mathrm{w} = Fq$$

نيوتن–متر (N.m) هو الوحدة القياسية للعمل، وهو يكافئ كيلوغرام–متر بالثانية مربع ($\text{kg.m}^2/\text{s}^2$).

العمل كضرب نقطي للأشعة

إن الـــصيغة السابقة ليست كاملة تماماً لأنّ – وكما تعلم الآن – القوة والإزاحة كميتان شعاعيتان. كيف يمكننا ضرب شعاعين؟ لحسن الحظ، الأمر بسيط في هذه الحالة لأن أشعة القوة والإزاحة تتجه بشكل عام بالاتجاه نفسه عند إنجاز العمل. يتضح في النهاية أن الضرب النقطي يقدم الجواب الذي نحتاج إليه؛ أي العمل كمقدار سُلَّمي، ولذلك، فهو يكافئ

$$\mathrm{w} = \mathbf{F} \bullet \mathbf{q}$$

حيث إنّ **F** شعاع القوة مقدراً بالنيوتن وفق اتجاه محدد، و**q** شعاع الإزاحة مُقدراً بالمتر وفق اتجاه محدد. تكون اتجاهات **F** و**q** دائماً نفسها. لاحظ رمز النقطة هنا (•)، وهي نقطة كبيرة وبالتالي يمكن تمييز الضرب النقطي للأشعة من الضرب السُلّمي العادي للمتحولات أو الوحدات أو الأعداد كما في $kg.m^2/s^2$.

طالما أن أشعة الإزاحة والقوة تتجه بالاتجاه نفسه، يمكننا ببساطة ضرب طويلاتها والحصول على النتيجة الصحيحة للعمل المُنجَز. تذكر فقط بأن العمل مقدار سُلّمي وليس شعاعاً.

رفع جسم

تخيل أننا رفعنا جسماً كتلته 1.0 kg للأعلى بشكل معاكس للجاذبية الأرضية. إن الطريقة الأسهل لتصور ذلك هي استخدام مجموعة البكرة والحبل. (افترض أن البكرة عديمة الاحتكاك، والحبل لا يمتط). افترض أنك تقف على الأرض، ماسكاً الحبل، وتشده للأسفل. يجب أن تُطبِّق قوة محددة لمسافة محددة. تتجه أشعة القوة والإزاحة في النقطة التي تحرك فيها يديك بالاتجاه نفسه. يمكنك أن تهز ذراعيك جيئةً وذهاباً أثناء شدِّك للحبل، ولكن لن يؤدي ذلك عملياً إلى أي فرق في كمية العمل اللازم لرفع الجسم لمسافة معينة، لذلك دعنا نحافظ على بساطة الأشياء ولنفترض أنك تشد الحبل باتجاه مستقيم.

تُترجم قوة الشد للأسفل على الجسم بشعاع قوة مكافئ **F** يتجه للأعلى (الشكل (8-4)). ينتقل الجسم للأعلى بمقدار شدِّك للحبل، أي بمسافة **q**. ما هو مقدار القوة التي تشد بها؟ إنها القوة المطلوبة لمعاكسة قوة جاذبية الكتلة. إن قوة الجاذبية $\mathbf{F}_g$ للجسم هي حاصل ضرب كتلة الجسم m بشعاع تسارع الجاذبية $\mathbf{a}_g$. إن قيمة $\mathbf{a}_g$ هي تقريباً $9.8\ m/s^2$ ويتجه مباشرة للأسفل. لرفع الجسم، يجب تطبيق قوة مقدارها $\mathbf{F} = m\mathbf{a}_g = (9.8\ m/s^2)(1.0\ kg) = 9.8\ kg.m/s^2 = 9.8\ N$ وتتجه مباشرةً للأعلى.

مسألة (8-4)

لنأخذ بالاعتبار المثال المشروح سابقاً في الشكل (8-4). لنفترض أنك رفعت الجسم لمسافة 1.5 m. ما هو مقدار العمل المُنجَز؟

حل (8-4)

تساوي القوة **F** المُطبَّقة لنقل الجسم باتجاه الأعلى، حاصل ضرب الكتلة $m = 1.0\ kg$ بتسارع الجاذبية $\mathbf{a}_g = 9.8\ m/s^2$ المتجه للأعلى:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}_g = (1.0\ kg)(9.8\ m/s^2) = 9.8\ kg \bullet m/s^2$$

يجب تطبيق هذه القوة لمسافة $\mathbf{q} = 1.5\ m$ للأعلى، وبالتالي العمل w يساوي إلى الضرب النقطي $\mathbf{F} \bullet \mathbf{q}$. بما أن **F** و**q** يتجهان بالاتجاه نفسه، يمكننا ببساطة ضرب طويليتيهما:

$$w = Fq = (9.8\ kg.m/s^2)\ (1.5\ m)$$
$$= 14.7\ kg \bullet m^2/s^2$$

يجب تقريب ذلك الرقم بتدويره ليصبح $15\ kg \bullet m^2/s^2$ لأن بيانات الدخل مُعطاة برقمين هامين.

تبدو هذه الوحدة، كيلوغرام - متر مربع بالثانية مربع عويصة، أليس كذلك؟ إن التفكير بها على أنها نيوتن-متر قد يساعد قليلاً. ولكن لحسن الحظ، يوجد اسم آخر لهذه الوحدة، وهو *الجول*، ويُرمز له J. بالنسبة للجسم الوارد في المسألة (8-4) فقد قمت بعمل يساوي 15 J تقريباً. الجول هو وحدة هامة في الفيزياء، والكيمياء، والكهرباء، والإلكترونيات. سوف يتكرر مرات ومرات إذا تقدمت بدراستك في أحد هذه الحقول.

الطاقة

تتواجد الطاقة بعدة أشكال. نسمع من وقت لآخر عن "أزمة الطاقة". يتحدث المذيعون عادة عن نقص الطاقة المتوفرة من وقود المستحثات المتفحمة، كالبترول والغاز الطبيعي. ربما وجدت برميل بترول وجلست أمامه. أين الطاقة فيه؟ يبدو وكأنه لا يقوم بشيء؛ إنه مجرد حاوية كبيرة لسائل داكن سميك. ولكن، إذا أشعلت فيه النار (لا تقم بذلك)، تظهر الطاقة التي يحتويها بشكل حي. تُقاس الطاقة كالعمل بالجول. في الحقيقة، أحد تعاريف الطاقة هو "القدرة على القيام بالعمل".

الطاقة الكامنة

انظر مرة أخرى للحالة الموضحة في الشكل (8-4). عند رفع جسم كتلته m لمسافة **q**، تُطبّق عليه قوة **F**. تخيل ما سيحدث لو أفلتَ الحبل وسمحت للجسم بالسقوط.

افترض أن $m = 5$ kg. وذلك يساوي حوالى 11 باونداً في حقل الجاذبية الأرضي. افترض أن الجسم صلبٌ وقاسٍ، كحجر الطوب. لو رفعت حجر الطوب ميليمترين، وتركته يسقط فإنه سيضرب الأرض دون إحداث صوت كبير. إذا رفعته لمسافة 2 m، وتركته يسقط فإنه سيصدع أو يثقب غطاء الأرضية، وقد يتشظى حجر الطوب نفسه. لو رفعت حجر الطوب 4 m، وتركته يسقط، ستحدث مشكلة بالتأكيد عند اصطدامه بالأرض. يمكن استثمار إسقاط جسم ثقيل لتنفيذ مهمة مفيدة وهي حفر شق في الأرض، ويمكن أن يتسبب ذلك في حدوث أضرار كبيرة.

هناك أمر ما حول رفع جسم للأعلى وهو إعطاؤه القدرة على القيام بعمل. يدعى هذا "الشيء" ***بالطاقة الكامنة***. الطاقة الكامنة بالمعنى الميكانيكي هي العمل نفسه. إذا طبقنا قوة طويلة شعاعها F على جسم بشكل معاكس للجاذبية الأرضية، وجرى رفع هذا الجسم لمسافة طويلة شعاعها q، ستُعطى الطاقة الكامنة عندها E_p بالصيغة

$$E_p = F_q$$

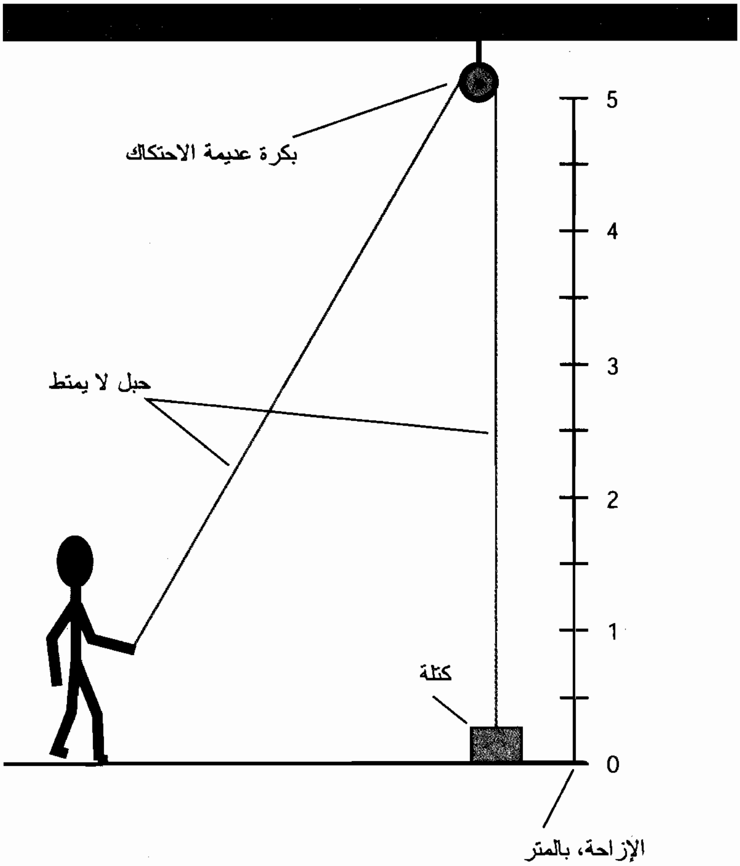
إنه تفسير مُفرط في تبسيط الطاقة الكامنة، كما ناقشنا للتو، يمكن أن توجد الطاقة الكامنة في برميل بترول حتى لو لم يجر رفعه. توجد الطاقة الكامنة أيضاً في الخلايا الإلكتروكيميائية، كبطارية السيارة. الطاقة الكامنة موجودة في الغازولين، والغاز الطبيعي، ووقود الصواريخ. ليس من السهل تكميمها في هذه الأشكال كما في المثال الميكانيكي في الشكل (8-4). ولكنها موجودة على أي حال.

مسألة (8-5)

عُــد ثانيةً إلى الشكل (8-4). إذا كانت كتلة الجسم 5.004 kg، ورُفع لمسافة 3.000 m، فكم ستبلغ الطاقة الكامنة؟ اعتبر أن قيمة طويلة تسارع الجاذبية الأرضية $a_g = 9.8067\ m/s^2$ يمكنك أن تهمل الأشعة هنا لأن كل شيء يحدث على خط مستقيم.

حل (8-5)

أولاً، يجب أن تُحدِّد القوة المطلوبة لرفع جسم كتلته 5.004 kg في حقل الجاذبية الأرضية:



الشكل (8-4): العمل المُنجَز عند تطبيق قوة لمسافة محددة. في هذه الحالة القوة المطبقة للأعلى على جسم بشكل يعاكس جاذبية الأرض.

$$F = ma_g = (5.004\ \text{kg})(9.8067\ \text{m/s}^2) = 49.0727268\ \text{N}$$

الطاقة الكامنة هي حاصل ضرب القوة بالإزاحة:

$$Ep = Fq = (49.0727268\ \text{N})(3.000\ \text{m}) = 147.2181804\ \text{J}$$

مطلـــوب مـــنا هـــنا أربعـــة أرقـــام هامة لأن بيانات الدخل الأقل دقة ذات أربعة أرقام هامة. لذلك $E_p = 147.2J$.

الطاقة الحركية

لنفترض أن الجسم الموضح في السيناريو في الشكل (8-4)، قد رُفع لمسافة محددة، بحيث تكون طاقته الكامنة E_p. ماذا سيحدث لو أفلتنا الحبل، وسقط الجسم على الأرض؟ أولاً، قد يؤدي ذلك لحدوث ضرر، لـــلأرض أو للجـــسم عند الارتطام. ثانياً، قد يتحرك، وفي الحقيقة يتسارع، عند الارتطام. ثالثاً، ستتحول طاقـــة الجسم الكامنة نتيجة الرفع، بكاملها إلى أشكال أخرى: اهتزازية، وصوتية، وحرارية، وربما حركة خارجية للقطع الطائرة للمادة أو غطاء الأرضية.

فكـــر الآن بالحالـــة قـــبل ارتطام الجسم بالأرض بفاصل زمني متناه في الصغر؛ لحظة. تكون الطاقة الحـــركية التي يملكها الجسم في هذه اللحظة مساوية للطاقة الكامنة للجسم المرفوع. ستُبدَد كل هذه الطاقة الحركية أو تتحول إلى شدة ارتطام. الطاقة الحركية

$$E_k = Fq = ma_gq = 9.8\ mq$$

حـــيث إن F القـــوة المطبقة، وq المسافة التي تم رفع الجسم إليها (وبالتالي مسـافة السقوط)، m كتلة الجـــسم، وa_g تسارع الجاذبية. نحن نتحدث هنا عن a_g على أنه يساوي $9.8\ m/s^2$، بدقة تصل إلى رقمين هامين.

هناك طريقة أخرى للتعبير عن E_k للأجسام المتحركة والتي لها كتلة m

$$E_k = mv^2/2$$

حيث إنّ v سرعة الجسم قبل الارتطام مباشرة. نستطيع استخدام صيغ الإزاحة، والسرعة، والتسارع الـــواردة في الفـــصل السابع لحساب السرعة الآنية للجسم عند اصطدامه بالأرض، ولكن لا حاجة لذلك. لديـــنا مسبقاً صيغة للطاقة الحركية وهي الصيغة الواردة في المثال (8-4). إن صيغة شعاع السرعة-الكتلة الأكثر هي الصيغة الأكثر انتشاراً والتي تُطبَّق على أي جسم متحرك، حتى لو لم يجر إنجاز العمل.

يجب ذكر ملاحظة أخرى هنا. ستلاحظ أنك تستخدم تدوين m (حرف صغير مائل m) للكتلة وm (حرف صغير غير مائل m) للأمتار. من السهولة أن لا تهتم أو تخلط بينهما ولكن لا تفعل ذلك.

مسألة (8-6)

عُد ثانية إلى الشكل (8-4). افترض أن كتلة الجسم $m = 1.0$ kg، وأن الجسم رُفع لمسافة 4.0 m. حدّد الطاقة الحركية التي يبلغها في لحظة ما قبل ارتطامه بالأرض، وفقاً لطريقة قوة/إزاحة. استخدم $9.8\ m/s^2$ كقيمة a_g، قيمة تسارع الجاذبية.

حل (8-6)

يجري الحساب وفقاً للصيغة $F = ma_gq$، حيث إنّ $m = 1.0$ kg، و$a_g = 9.8\ m/s^2$. لذلك:

$$E_k = 1.0\ \text{kg} \times 9.8\ \text{m/s}^2 \times 4.0\ \text{m}$$
$$= 39.2\ \text{kg•m}^2/\text{s}^2 = 39.2\ \text{J}$$

أُعطيتْ كل قيمة للدخل لنا برقمين هامين، وبالتالي يجب تقريب قيمة E_k بالتدوير لتصبح $E_k = 39$ J.

مسألة (8-7)

في المـــثال الوارد في المسألة (8-6). حدّد الطاقة الحركية للجسم في لحظة ما قبل ارتطامه بالأرض باســـتخدام طـــريقة كتلة/سرعة. برهن أن ذلك يقود إلى الجواب النهائي نفسه وبالوحدات نفسها تماماً كالطريقة المستخدمة في المسألة (8-6).

حل (8-7)

الحـــيلة هـــنا بحساب سرعة حركة الجسم قبل ارتطامه بالأرض. يتطلب ذلك إجراء التمرين الذي تجنبناه قبل عدة فقرات. ويتطلب ذلك بعض الأرقام. ذلك ليس صعباً ولكنه ممل قليلاً.

دعنا نفهم أولاً المدة التي يستغرقها الجسم للسقوط. تذكر من الفصل السابع أن

$$q = a_{avg}\, t^2/2$$

حيث إن q الإزاحة، وa_{avg} التسارع المتوسط، وt الزمن المنقضي. يمكن هنا استبدال a_{avg} بالتسارع a_g لأن تـــسارع الجاذبـــية لا يتغيّر. (لأنه دائماً بقيمته الوسطية). يمكننا إذاً معالجة الصيغة السابقة للحل لإيجاد الزمن:

$$t = (2q/a_g)^{½}$$
$$= [(2 \times 4.0\ \text{m})/(9.8\ \text{m/s}^2)]^{½}$$
$$= (8.0\ \text{m} \times 0.102\ \text{s}^2/\text{m})^{½}$$

"انتظـــر!" قـــد تقـــول." مـــاذا نفعل بالتسارع a_g؟ من أين أتت الوحدة s^2/m؟" لقد ضربنا بمقلوب الكمية a_g، والتي تُماثل القسمة على الكمية a_g نفسها. عندما نستخدم مقلوب كمية جرى التعبير عنها بدلالة الوحدة، يجب أن نستخدم مقلوب الوحدة أيضاً. ومن هنا أتت "الوحدة" s^2/m. ولنتابع الآن

$$t = (8.0\ \text{m} \times 0.102\ \text{s}^2/\text{m})^{½}$$
$$= 0.816\ \text{m•s}^2/\text{m})^{½}$$
$$= (0.816\ \text{s}^2)^{½} = 0.9033\ \text{s}$$

جـــرى اختصار المتر في الإجرائية السابقة. يمكن اختصار الوحدات كالأعداد والمتحولات لتصبح وحدة (العدد 1) عند تقسيمها على نفسها. دعنا لا نُدوِّر القيمة 0.9033 s لأنه علينا إجراء المزيد من الحسابات.

تذكـــر الآن من الفصل السابع صيغة العلاقة بين شعاع السرعة الآنية v_{inst}، والتسارع a، والزمن t لجسم يتسارع بمعدل ثابت:

$$v_{inst} = at$$

يمكننا هنا استبدال a بالتسارع a_g كما في السابق. نعلم مسبقاً a_g وt:

$$v_{inst} = (9.8\ m/s^2)\ (0.9033\ s)$$
$$= 8.85234\ m/\ s$$

لا تقلق حول حقيقة حصولنا على أرقام أكثر في أعدادنا. سنُدوِّر هذه الأرقام في النهاية.

يوجد فقط إجراء حسابي آخر يجب تنفيذه وذلك باستخدام صيغة E_k بدلالة v_{inst} وm. نعلم الآن أن $v_{inst} = 8.85234\ m/s$ و$m = 1.0\ kg$. لذلك

$$E_k = m{v_{inst}}^2/2$$
$$= (1.0\ kg)\ (8.85234\ m/s)^2/2$$
$$= (78.3639\ kg{\bullet}m^2/s^2)/2$$
$$= 39.18195\ kg{\bullet}m^2/s^2$$

إنّ الوحدة $kg{\bullet}m^2/s^2$ هي نفسها الجول (J). وبما أننا تحت عنوان رقمين هامين، يجب تقريب القيمة العددية إلى 39. وذلك يعطي الجواب نفسه وبالوحدات نفسها تماماً كما في طريقة قوة/إزاحة المستخدمة في المسألة (8-6).

لدينا الخيار بالطبع باستخدام الطريقة الموضحة في المسألة (8-6) لتحديد الطاقة الحركية وفق السيناريو الموضح في الشكل (8-4). لقد جررنا أنفسنا إلى المسألة (8-7) كتدريب لنرى أياً من الطريقتين تعمل. إنه ليس من السيئ أبداً التحقق من صحة صيغة أو مفهوم!

الاستطاعة

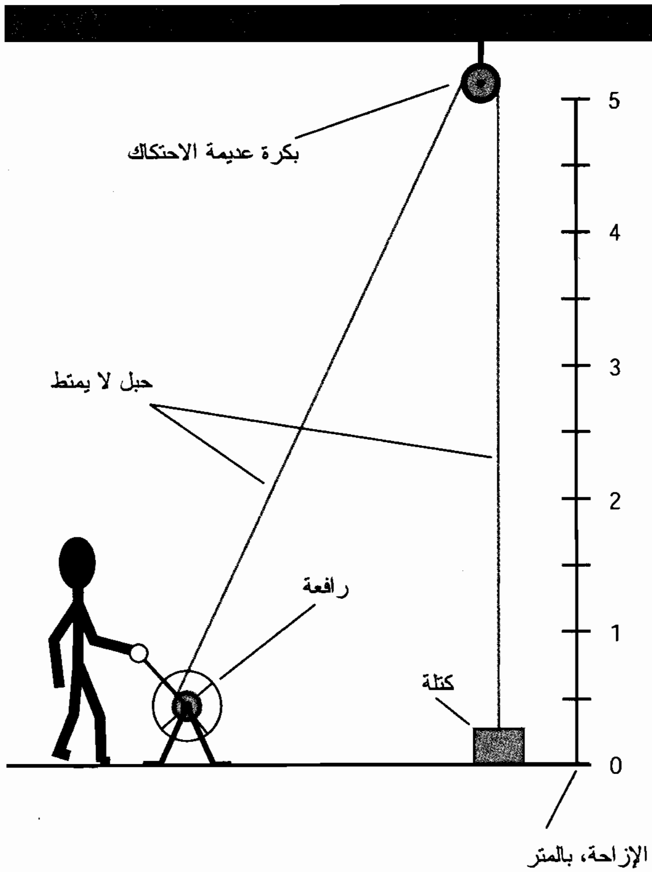
الاستطاعة في سياق الفيزياء، هي معدل استهلاك أو تحويل الطاقة إلى شكل آخر. ميكانيكياً، الاستطاعة هي معدل إنجاز العمل. الوحدة القياسية للاستطاعة هي الجول بالثانية (J/s)، والاسم الشائع لهذه الوحدة هو *الوات* (W). تترافق الاستطاعة دائماً تقريباً مع الطاقة الحركية. يُشار في بعض الأحيان لمعدّل تخزين الطاقة الكامنة بالاستطاعة.

الاستطاعة الميكانيكية

في الأمثلة الموضحة في الشكل (8-4)، يكتسب الجسم طاقة كامنة عند رفعه، وتُحوّل هذه الطاقة الكامنة إلى طاقة حركية عند سقوط الجسم (إذا سُمح له بالسقوط). يُعتبر الانفجار الصوتي الأخير، وأمواج الصدمة، وربما الشظايا المبعثرة نهاية الطاقة الحركية المضافة للجسم عبر رفعه. أين مكان الاستطاعة في هذا السيناريو؟

يمكن استخدام تعديل طفيف في هذا الموضوع للتحدث عن الاستطاعة. يوضح الشكل (8-5) ذلك. افترض أنه بدلاً من النهاية الحرة للحبل، لديك رافعة يمكنك تدويرها لرفع الجسم في النهاية الأخرى للحبل. عندما تبدأ بتدوير ذراع الرافعة (أو استخدام محرك لتدويره)، يبدأ الجسم بالارتفاع عن الأرض. إذا كان

الجسم ثقيلاً، سيكون من الضروري استخدام نظام بكرة معقد. وبالتالي من الأفضل أن تكون البكرة قوية! ينطبق الأمر نفسه على الحبل. ودعنا لا ننسى طريقة تثبيت البكرة بالسقف.



الشكل (8-5): مثال توضيحي للاستطاعة. يمكن استخدام رافعة وبكرة لرفع الأجسام الثقيلة.

دعنا نقوم بذلك!

سنستهلك طاقة لرفع الجسم. يمكنك تدوير ذراع الرافعة، لتُكسب الجسم طاقة كامنة. إذا كان نظام البكـــرة معقداً، ستنخفض القوة المطلوبة لإدارة ذراع الرافعة بهدف رفع الجسم إلى المسافة المطلوبة، ولكن ذلك سيزيد من عدد الدورات التي تدير بها ذراع الرافعة. يمكن التعبير عن معدل استهلاك الطاقة المستخدمة لتدوير ذراع الرافعة بالوات ويشكل هذا المعدل الاستطاعة. تزداد الاستطاعة المستهلكة بزيادة سرعة تدوير ذراع الـــرافعة لرفع الكتلة المحددة. كلما ازداد وزن الجسم من أجل سرعة معينة لتدوير ذراع رافعة، كلما ازدادت الاســـتطاعة المطلوبة لرفع الجسم. نظرياً، يمكنك استهلاك استطاعة صغيرة لمدة زمنية طويلة وترفع الكتلة لمسافة 100 m، أو 1 km أو 100 km.

افتـــرض أن نظام الرافعة والبكرة عديم الاحتكاك وأن الحبل لا يمتط. وافترض أنك تدير ذراع الرافعة بـــسرعة دوران ثابتة. إن الاستطاعة المستهلكة بدلالة الجهد والعرق مضروبة بالزمن اللازم للرفع ستساوي الطاقة الكامنة التي اكتسبها الجسم. إذا كانت P الاستطاعة بالوات وt زمن تطبيق الاستطاعة P بالثانية، إذاً يمكن إيجاد الطاقة الكامنة المكتسبة من قبل الجسم E_p وفقاً لهذه الصيغة:

$$E_p = Pt$$

ويمكن إعادة كتابة هذه الصيغة لتصبح على الشكل

$$P = E_p/t$$

نعلـــم أن الطاقـــة الكامنة تساوي إلى الكتلة مضروبة بتسارع الجاذبية مضروبة بالإزاحة q. وبالتالي يمكن حساب الاستطاعة مباشرة من خلال الصيغة التالية

$$P = 9.8067\ mq/t$$

مسألة (8-8)

افتـــرض أنـــه جرى رفع جسم كتلته 200 kg لارتفاع 2.50 m في زمن مقداره 7.00 s. ما هي الاستطاعة المطلوبة لإنجاز هذه المهمة؟ اعتبر تسارع الجاذبية 9.8 m/s^2.

حل (8-8)

استخدم ببساطة الصيغة السابقة مع تقريب التسارع بالتدوير إلى رقمين هامين:

$$P = 9.8 \times 200 \times 2.50 / 7.00$$

$$= 700\ W$$

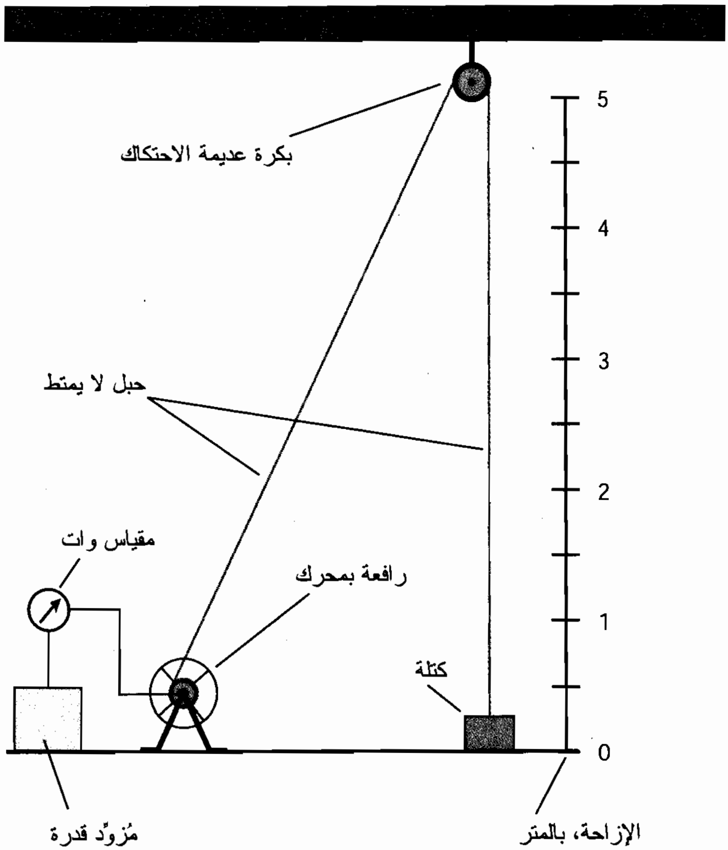
عـــندما نقـــول 700 W، فـــنحن تقنياً قد أخذنا رقمين هامين. كيف يمكننا التعبير عن ذلك هنا؟ تتلخص إحدى الطرق بكتابة العدد على الشكل 7.0×10^2 W. وتتلخص الطريقة الأخرى بكتابة العـــدد على الشكل 0.70 kW، حيث ترمز kW للكيلووات، والذي يساوي 1.000 W. توجد طريقة أخرى وهي كتابة العدد على الشكل 700 W ± 5 W والذي يعني " 700 W زائد أو ناقص 5 W". (إنه مدى الدقة التي نستطيع تحقيقها برقمين هامين). ولكن، قد يقبل معظم الفيزيائيين قولنا ببساطة 700 W. يوجد حدّ لمدى الرضا الذي يمكن أن نحصل عليه من هذه الأشياء دون أن نقود أنفسنا للجنون.

ســـتلاحظ أننا لم ننقل في المسألة (8-8) الوحدات إلى العبارة الكلية، ضربنا وقسمنا الأرقام فقط. لـــيس علينـــا القيام بذلك إذا عرفنا أن الصيغة تعمل، ونحن متأكدون من استخدام الوحدات المتوافقة مع بعضها البعض في سياق الصيغة. نحن نستخدم في هذه الحالة وحدات SI الأساسية (متر، كيلوغرام، ثانية)، وبالتالي نحن نعلم أننا نعمل بشكل صحيح في النهاية.

الاستطاعة الكهربائية

قد تقرر الاستغناء عن المجهود المتعب المبذول لتدوير ذراع الرافعة لرفع الأجسام الثقيلة للأعلى وذلك لإنجاز التجارب فقط من أجل توضيح طبيعة الاستطاعة. على أي حال، من الصعب قياس الاستطاعة الكهربائية مباشرة، على الرغم من إمكانية حسابها نظرياً كما في المسألة (8-8).

قد تقوم بتوصيل محرك كهربائي بالرافعة كما هو موضح في الشكل (8-6). وتقوم بتوصيل مقياس وات بين مُزوِّد القدرة والمحرك، لتتمكن من قياس الاستطاعة مباشرة. بالطبع، نفترض أن مردود المحرك 100 بالمئة، مع الافتراضات الأخرى التي تنص على أن الحبل لا يمتط وأن البكرة عديمة الاحتكاك. إن جميع هذه الافتراضات بالطبع غير موجودة في العالم الحقيقي. يوجد للبكرة الحقيقية احتكاك، والحبل الحقيقي يمتط، ومردود المحرك الحقيقي أقل من مردود المحرك المثالي. بالنتيجة، ستكون قراءة مقياس الوات الموصول في الشكل (8-6) أكبر من الرقم الذي سنحصل عليه إذا استخدمنا المخطط في الشكل (8-8) لحساب الاستطاعة.



الشكل (8-6): يمكن قياس الاستطاعة الكهربائية مباشرة عند استخدام محرك لقيادة الرافعة لرفع جسم ثقيل.

مردود النظام

افتـــرض أنـــنا وصـــلنا الجهاز كما في الشكل (8-6) وأننا قمنا بإجراء التجربة الموضحة في المسألة (8-8). قد نرى على مقياس الوات شيئاً مثل 800 W. يمكننا في هذه الحالة حساب مردود النظام بأكمله بتقـــسيم الاســـتطاعة الميكانيكـــية الفعلية (700 W) على استطاعة الدخل المقاسة (800 W). لو دعونا استطاعة الدخل P_{in} والاستطاعة الميكانيكية الفعلية P_{out}، بالتالي سيكون المردود Eff

$$Eff = P_{out}/P_{in}$$

إذا رغبت بحساب المردود المئوي (كنسبة مئوية)، $Eff_{\%}$، استخدم الصيغة

$$Eff_{\%} = 100\ P_{out}/P_{in}$$

مسألة (8-9)

خذ بالاعتبار السيناريو الموضح في المسألة (8-8) والشكل (8-6). إذا أظهر المقياس 800 W. ما هو المردود المئوي؟

حل (8-9)

استخدم الصيغة الثانية للمردود المقدمة سابقاً:

$$Eff_{\%} = 100\ P_{out}/P_{in}$$

$$Eff_{\%} = 100 \times 700/800$$

$$= 87.5 \text{ بالمائة}$$

إذا رغـــبت بأن تكون رسمياً وأردت أن تكون النتيجة في المسألة (8-8) برقمين هامين يجب عندها تدوير رقم المردود إلى 88 بالمائة.

امتحان موجز

عـــد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت على ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. لنفتـــرض أنه حدث حادث صغير في المرآب. أثناء تراجع السيارة A بسرعة 30 cm/s باتجاه الغرب، كانت السيارة B تبحث عن مكان للوقوف، وتتحرك باتجاه الشمال بسرعة 40 cm/s. تزن كل من السيارتين 1,000 kg، ما هي كمية الحركة الكلية للنظام قبل الاصطدام؟ تذكر أن كمية الحركة كمية شعاعية. انتبه أيضاً للوحدات.

(a) 700 kg•m/s، باتجاه الشمال الغربي.

(b) 100 kg•m/s، باتجاه الشمال الغربي.

(c) 500 kg•m/s، باتجاه الشمال الغربي.

(d) لا يوجد معلومات كافية للإجابة على هذا السؤال.

2. الدفع هو حاصل ضرب
(a) الزمن والمسافة.
(b) الزمن، والكتلة، والتسارع.
(c) الزمن، والكتلة، وشعاع السرعة.
(d) الزمن، وشعاع السرعة.

3. افترض أن متزلجاً كتلته 82.0 kg ينـــزلق على الجليد بسرعة 10.0 m/s. ما هي طاقته الحركية؟
(a) 820 J.
(b) 410 J.
(c) 8.20×10^4 J.
(d) 4.10×10^3 J.

4. جسم كتلته 10.0 kg جرى رفعه لمسافة 4.000 m في كوكب تسارع جاذبيته 6.000 m/s^2. ما هي كمية العمل اللازمة للقيام بذلك؟
(a) 60.0 J.
(b) 24.0 J.
(c) 40.0 J.
(d) 240 J.

5. افترض أنه جرى دفع جسم بقوة ثابتة على سطح عديم الاحتكاك. إذا ضربنا كتلة الجسم بالمدة الزمنية التي جرى فيها دفع الجسم، ثم ضربنا النتيجة بتسارع الجسم ضمن المدة الزمنية، فإنك ستحصل على
(a) كمية الحركة.
(b) شعاع السرعة.
(c) الدفع.
(d) كمية ليس لها معنى.

6. وفقاً لقانون مصونية كمية الحركة، في نظام مغلق مثالي، فإنه عند اصطدام جسمين
(a) لا يفقد النظام ولا يكتسب أي كمية حركة.
(b) لا يفقد الجسمان ولا يكتسبان أي كمية حركة.
(c) يجري جمع طويلات أشعة كميات الحركة.
(d) يجري ضرب طويلات أشعة كميات الحركة.

7. عند إجراء الحسابات مع الإشارة لجميع وحدات الكميات في الإجرائية بكاملها

(a) يجري ضرب وقسمة الوحدات كالأعداد.
(b) لا يمكن اختصار الوحدات.
(c) يمكن ضرب الوحدات ولكن لا يمكن قسمتها.
(d) يمكن جمع وطرح الوحدات، ولكن ليس ضربها أو قسمتها.

8. عند تمثيل الجول بالوحدات الأساسية فهو يكافئ
(a) كيلوغرام-متر بالثانية مربع.
(b) كيلوغرام-متر.
(c) كيلوغرام-متر مربع بالثانية مربع.
(d) متر بالثانية مربع.

9. يرسو قارب كتلته 5,000 kg في بحيرة عديمة الاحتكاك، ولا يوجد رياح تعاكس حركة القارب. قام القبطان بتشغيل المحرك بثبات لمدة 10.00 ثوانٍ بحيث تحرك القارب للأمام وفق خط مستقيم ثم قام بإطفاء المحرك. وصل القارب لسرعة 5.000 متر بالثانية. ما هو الدفع المُزوَّد للقارب؟
(a) 2.500×10^5 kg•m/s.
(b) 2.500×10^4 kg•m/s.
(c) 2.500 kg•m/s.
(d) 6.250×10^4 kg•m/s.

10. أي مما يلي ليس له تأثير على كمية الحركة لجُسَيم كروي متحرك؟
(a) سرعة الجسيم
(b) قطر الجسيم
(c) اتجاه حركة الجسيم
(d) كتلة الجسيم

الفصل 9

جسيمات المادة

إن فكرة أن المادة موجودة على شكل جسيمات، وليس على شكل كتلة مستمرة، موجودة منذ عدة قرون. كيف نشرح حقيقة أن كثافة بعض المواد أكبر من كثافة المواد الأخرى، وأن بعض المواد تحافظ على شـــكلها بيـــنما تتدفق مواد أخرى بحرية، وأن بعض هذه المواد مرئية بينما البعض الآخر لا؟ يصعب شرح نمـــاذج وجـــود المادة بطريقة أخرى غير *النظرية الجسيمية*. افترض الكيميائيون المنطقيون القدماء أن المادة تتكون من جسيمات غير مرئية صغيرة جداً أو *ذرات*.

النظريات المبكرة

تتكون جميع الذرات من جسيمات صغيرة لا تعدّ تدور بسرعة. إن هذه *الجسيمات الذرية الجزئية* كثيفة، ولكـــن تكون المادة عادةً بمجملها عبارة عن فضاء فارغ. تبدو المادة صلبة ومستمرة لأن الجسيمات صغيرة جداً بحيث لا يمكننا أن نراها، وهي تتحرك بشكل سريع بحيث تظهر حركاتها الفردية غير واضحة المعالم حتى لو تمّت رؤيـــة الجـــسيمات نفسها. ولكن، تكون الفراغات داخل الذرات أكبر بكثير من الجسيمات التي تُكوِّن هذه الـــذرات. لو استطعنا تصغير أنفسنا إلى مستوى جزء من الذرة وأبطأنا الزمن بالنسب الصحيحة، ستبدو قطعة المعـــدن كـــسرب هستيري ضخم من البعوض. هل تحقّق علماء الفيزياء والكيمياء الأوائل من أن الذرات التي حلموا بها تتكون فعلياً من جسيمات أصغر، وأن هذه الجسيمات تتكون بدورها من جزيئات أصغر، وأن بعض الناس من الأجيال القادمة سيعتقد بأن السلسلة ستمتد إلى مقاييس أصغر وأصغر *بشكل لا نهائي*.

القطعة الأصغر

استـــنتج العلمـــاء مـــنذ آلاف السنين طبيعة جسيم المادة من خلال مراقبة المواد كالماء، والصخور، والمعـــادن. تخـــتلف هذه المواد جداً عن بعضها البعض. ولكن، تبقى المادة – النحاس مثلاً نفسها – أينما وُجـــدت. اعـــتقد الفيـــزيائيون الأوائـــل حتى من دون إجراء التجارب المُعقّدة أنه يكون لهذه المواد هذه السلوكيات المتماسكة فقط إذا كانت تتكون من أنماط وحيدة أو جسيمات مرئية.

مـــرَّ وقـــت طويل قبل أن يبدأ الناس بالتحقق من مدى حقيقة تعقيد هذا العمل. حتى اليوم، يوجد الكـــثير مـــن الأشياء التي لا يعلمها العلماء. مثلاً هل يوجد جسيم مادي بحيث يكون أصغر ما يمكن؟ هل ســـنجد جسيمات أصغر وأصغر عندما نُطوِّر أجهزة قوية أكثر وأكثر لسبر أعماق الفضاء الداخلي؟ حتى هذه الفكرة صعبة الفهم نظرياً. في حال وجود شيء ما يمثل الجسيم الأصغر الممكن، لماذا لا يمكن تقسيمه إلى نـــصفين؟ ولكن، إذا كان بالإمكان تقسيم الجسيم إلى أجزاء بشكل مستمر، إذاً ما هو الجسيم الأول الجوهري؟ هل هو نقطة هندسية بحجم صفر؟ وماذا ستكون كثافة مادة كهذه؟ كتلة ما مقسمة على صفر؟ ليس لذلك معنى! يبقى علينا إيجاد الجواب الحرفي والحاسم لهذا اللغز. قد لا نعلم مطلقاً كل ما هو موجود لنعلمه عن المادة. قد لا يكون حتى من الممكن معرفة كل شيء عن المادة.

العناصر

حتى العام 1900، رفض من لهم صلة بموضوع المادة تصديق النظرية الذرية للمادة. ولكن اليوم يقبلها الجميع عملياً. تشرح النظرية الذرية سلوك المادة بشكل أفضل من أي نظرية أخرى. لا يزال البعض يعتقد بأن المادة مستمرة؛ ولا يزال قلة يعتقدون بأن كوكبنا الأرضي مسطح، تماماً.

أخـــيراً، حدّد العلماء 92 نوعاً مختلفاً من المواد الأساسية في الطبيعة وتدعى *بالعناصر*. لاحقاً، جرى تـــصنيع المزيد من العناصر صناعياً. لا تزال إجرائية الاكتشاف هذه مستمرة. قام فيزيائيو الذرة باستخدام آلات تدعى *مُسرِّعات الجسيم*، وتدعى في بعض الأحيان *بمحطِّمات الذرة* بصناعة عناصر صناعية يستحيل تواجدها في الطبيعة، على الأقل تحت شروط يمكن أن نقول عنها أنها طبيعية.

كل عنصر هو عنصر فريد

إن ذرات العناصـــر المختلفة مختلفة دائماً. يمكن للتغيّر الطفيف في الذرة أن يُحدث اختلافاً هائلاً في ســـلوكها. يمكـــنك العيش وأنت تتنفس الأوكسجين النقي ولكن لا يمكنك العيش على النتروجين النقي. يسبب الأوكسجين تأكسد (صدأ) المعدن، ولا يسبب النتروجين ذلك. سيحترق الخشب بعنف في جو من الأوكـــسجين النقـــي ولكـــن لن يشتعل في جو من النتروجين النقي. ولكن يكون مظهرهما، ورائحتهما، وملمـــسهما نفـــسه تمامـــاً في الضغط والحرارة النظاميين. كلاهما غاز لا يمكن رؤيته، وكلاهما لا لون له، وكلاهما لا رائحة له، وهما متقاربان في الوزن. هذه المواد مختلفة جداً لأن الأوكسجين والنتروجين يتكونان من أعداد مختلفة من الجسيمات المتطابقة الأخرى.

يـــوجد كـــثير من الأمثلة الأخرى في الطبيعة والتي يمكن للتغيير الطفيف في البنية الذرية أن يُحدث اختلافاً كبيراً في الطريقة التي تتصرف بها المادة.

النواة

إن جـــزء الذرة الذي يعطي العنصر هويته هو النواة. تتكون النواة من نوعين من الجسيمات الكثيفة جـــداً وهما البروتون والنيترون. للبروتونات والنيترونات الكتلة نفسها تقريباً، ولكن يملك البروتون شحنة كهربائية، بينما ليس للنيترون شحنة.

البروتون

إن البروتونات صغيرة جداً بحيث لا نستطيع رؤيتها مباشرة، حتى بوجود أقوى المجاهر. تحمل البروتونات شحنة كهربائية موجبة، وشحنة أي بروتون هي نفسها شحنة أي بروتون آخر. كتلة البروتون في حالة السكون هي كتلة أي بروتون آخر في حالة السكون أيضاً. يقبل معظم العلماء افتراض أن جميع البروتونات متطابقة، على الأقل في هذا الجزء الخاص من عالمنا، وذلك على الرغم من أنها تكسب كباقي الجسيمات كتلة إذا جرى تسريعها بسرعة قصوى. تحدث هذه الزيادة في الكتلة بسب التأثيرات النسبية؛ ستتعلم ذلك لاحقاً.

بينما لا يكون البروتون الواحد مرئياً وليس له كتلة كافية لإحداث تأثير بنفسه، إلا أنه يمكن لوابل من البروتونات عالية السرعة أن يكون له تأثيرات كبيرة على المادة. البروتونات كثيفة بشكل لا يُصدَّق. لو استطعت أن تأخذ مقدار ملعقة صغيرة من البروتونات بالطريقة نفسها التي تأخذ بها ملعقة صغيرة من السكر - بحيث تكون البروتونات محزومة مع بعضها بإحكام كبلورات السكر - ستزن العينة الناتجة أطناناً في حقل الجاذبية الأرضي. إذا سقط حجر مصنوع من البروتونات الصلبة على الأرض فإنه سيخترق القشرة الصخرية كما تخترق الرصاصة الهواء.

النيترون

يملك النيترون كتلة أكبر بشكل طفيف من الكتلة التي يملكها البروتون. ليس للنيترونات شحنة كهربائية، وهي كثيفة كالبروتونات. ولكن، بينما تبقى البروتونات مدة طويلة مع بعضها في الفضاء الحر، فإن النيترونات ليست كذلك. يبلغ *نصف عُمر* النيترون حوالى 15 دقيقة. ذلك يعني أنه لو جمعت كمية من النيترونات، ولنقل، مليون نيترون، وتركتها تسبح في الفضاء، سيبقى لديك حوالى 500.000 نيترون بعد 15 دقيقة. وسيبقى لديك بعد 30 دقيقة 250.000 نيترون تقريباً؛ وسيبقى لديك بعد 45 دقيقة 125.000 نيترون تقريباً.

تستطيع النيترونات البقاء مدة أطول من الزمن عندما تكون في نوى الذرات. إننا محظوظون لأنه لو لم يكن كذلك فلن تكون المادة كما نعرفها. تستطيع النيترونات أيضاً أن تبقى لمدة أطول من الزمن عند ضغط عدد ضخم من النيترونات مع بعضها بإحكام. يحدث ذلك عند انفجار النجوم الكبيرة، وعندما تنهار المادة المتبقية تحت تأثير جاذبيتها الخاصة. إن الناتج النهائي لسلسلة الحوادث هذه هو نجم النيترون.

العناصر الأبسط

العنصر الأبسط هو الهيدروجين، وتتكون نواته من بروتون واحد فقط؛ لا يوجد عادةً نيترونات. إنه العنصر الأكثر شيوعاً في الكون. قد تملك نواة الهيدروجين في بعض الأحيان نيتروناً واحداً أو اثنين مع البروتون، ولكن ذلك غير شائع. ومع ذلك تلعب أنواع الهيدروجين الطافرة هذه أدواراً هامة في الفيزياء الذرية.

العنصر الثاني الأكثر وفرة في الكون هو الهليوم. تملك ذرته نواة تحوي عادةً على بروتونيْن ونيترونيْن. يتحول الهيدروجين إلى هليوم داخل الشمس، ويعطي الطاقة في هذه العملية. وهذا ما يجعل الشمس تُشع. تدعى هذه العملية *بالاندماج النووي* أو *الاندماج الذري* وهي المسؤولة أيضاً عن القوة الانفجارية المرعبة للقنبلة الهيدروجينية.

العدد الذري

وفقاً للنظرية الذرية الحديثة، تكون البروتونات متماثلة تماماً في الكون. وجميع النيترونات متماثلة أيضاً. يعطي *العدد الذري* والذي يمثل عدد البروتونات في نواة العنصر، ذلك العنصر هويته.

العنصر الذي يملك ثلاثة بروتونات هو *الليثيوم*، وهو معدن خفيف يتفاعل بسهولة مع الغازات كالأوكسجين أو الكلور. يمتلك الليثيوم ثلاثة بروتونات؛ بشكل معاكس، أي عنصر تملك نواته ثلاثة بروتونات يجب أن يكون الليثيوم. العنصر الذي يملك أربعة بروتونات هو *البيريليوم* وهو أيضاً معدن. يملك الكربون ستة بروتونات في نواته، ويملك النتروجين سبعة، والأوكسجين ثمانية. بشكل عام، إذا ازداد عدد البروتونات في نواة الذرة، يزداد عدد النيترونات أيضاً. لذا تكون العناصر التي تملك عدداً ذرياً عالياً، كالرصاص، أكثر كثافة من العناصر ذات العدد الذري المنخفض كالكربون. ربما تكون قد قارنت رصاصة بقطعة فحم مماثلة لها بالحجم ولاحظت هذا الفرق.

لو استطعت بشكل ما إضافة بروتونين لنواة كل عنصر في عينة من الكربون، ستحصل على ذرات عددها الذري يساوي العدد الذري للأوكسجين. ولكن، الكلام أسهل من الفعل، فذلك مستحيل حتى ولو مع ذرة واحدة. يستحيل تحويل عنصر إلى عنصر آخر؛ ولكن تقوم الشمس بذلك كل الوقت، دامجة الهيدروجين لتحوله إلى هيليوم. وعلى الرغم من ذلك فإن العملية أبعد ما تكون عن العملية البسيطة. حاول الخيميائيون في الأزمنة الغابرة القيام بذلك؛ كان المثال الأكثر شهرة لأعمالهم البحث في تحويل الرصاص (ذو العدد الذري 28) إلى ذهب (العدد الذري 79). لم ينجحوا أبداً كما يعلم كل شخص. لم ينجح الأمر حتى أربعينيات القرن العشرين، وذلك عند اختبار القنابل الذرية الأولى، حيث جرى "تشكيل" هذه العناصر فعلياً من قبل الإنسان. كانت النتائج مختلفة تماماً عن أي شيء سعى الخيميائيون جاهدين له.

يسرد الجدول (9-1) العناصر المعروفة وفق الترتيب الأبجدي، مع أسماء العناصر في العامود الأول، والرموز الكيميائية القياسية في العامود الثاني والأعداد الذرية في العامود الثالث.

النظائر

يمكن أن يتغيّر عدد النيترونات في ذرات عنصر ما كالأوكسجين. ولكن بغض النظر عن عدد النيترونات، تحافظ العناصر على هويتها بالاعتماد على العدد الذري. يؤدي اختلاف أعداد النيترونات إلى اختلاف *نظائر* العنصر من المادة المعينة.

الجدول (9-1): العناصر الكيميائية مرتبة أبجدياً بحسب الاسم، وتتضمن الرموز الكيميائية والأعداد الذرية من 1 إلى 118 (حتى زمن كتابة هذا الكتاب، العناصر الكيميائية ذات الأعداد الذرية 113 أو 115 أو 117 لم تكن معروفة).

اسم العنصر	الرمز الكيميائي	العدد الذري
أكتينيوم	Ac	89
ألمنيوم	Al	13
أميريكيوم	Am	95
أنتيمون	Sb	51
أرغون	Ar	18
أرسينيك	As	33
أستاتين	At	85
باريوم	Ba	56
بيركليوم	Bk	97
بيريليوم	Be	4
بيسمث	Bi	83
بوريوم	Bh	107
بورون	B	5
بورمين	Br	35
كاديميوم	Cd	48
كالسيوم	Ca	20
كاليفورنيوم	Cf	98
كربون	C	6
سيريوم	Ce	58
سيزيوم	Cs	55
كلور	Cl	17
كروم	Cr	24
كوبالت	Co	27
نحاس	Cu	29
كوريوم	Cm	96
دابنيوم	Db	105

اسم العنصر	الرمز الكيميائي	العدد الذري
ديسبوسيوم	Dy	66
أينشتينيوم	Es	99
إربيوم	Er	68
أوروبيوم	Eu	63
فيرميوم	Fm	100
فلور	F	9
فرانسيوم	Fr	87
كادولينيوم	Gd	64
غاليوم	Ga	31
جيرمانيوم	Ge	32
ذهب	Au	79
هافنيوم	Hf	72
هاسيوم	Hs	108
هيليوم	He	2
هوليميوم	Ho	67
هيدروجين	H	1
إنديوم	In	49
يود	I	53
إريديوم	Ir	77
حديد	Fe	26
كريبتون	Kr	36
لانتانيوم	La	57
لورنسيوم	Lr أو Lw	103
رصاص	Pb	82
ليثيوم	Li	3
لوتيتيوم	Lu	71
مغنيزيوم	Mg	12
منغنيز	Mn	25
ميتينيريوم	Mt	109

اسم العنصر	الرمز الكيميائي	العدد الذري
مندليفيوم	Md	101
زئبق	Hg	80
موليبيدنيوم	Mo	42
نيوديميوم	Nd	60
نيون	Ne	10
نيبتونيوم	Np	93
نيكل	Ni	28
نيوبيوم	Nb	41
أزوت (نيتروجين)	N	7
نوبيليوم	No	102
أوسيميوم	Os	76
أوكسجين	O	8
بالاديوم	Pd	46
فوسفور	P	15
بلاتين	Pt	78
بلوتونيوم	Pu	94
بولونيوم	Po	84
بوتاسيوم	K	19
باراصوديوم	Pr	59
بروميثيوم	Pm	61
بروتاكتينيوم	Pa	91
راديوم	Ra	88
رادون	Rn	86
رينيوم	Re	75
روديوم	Rh	45
روبيديوم	Rb	37
روثينيوم	Ru	44
روثرفورديوم	Rf	104
ساماريوم	Sm	62
سكانديوم	Sc	21

اسم العنصر	الرمز الكيميائي	العدد الذري
سيبارجيوم	Sg	106
سيلينيوم	Se	34
سيليكون	Si	14
فضة	Ag	47
صوديوم	Na	11
ستورنتيوم	Sr	38
الكبريت	S	16
التنتاليوم	Ta	73
تيكنيتيوم	Tc	43
تيليريوم	Te	52
تيربيوم	Tb	65
تاليوم	Tl	81
توريوم	Th	90
ثوليوم	Tm	69
قصدير	Sn	50
تيتانيوم	Ti	22
تنغستين	W	74
يوننبيوم	Uub	112
يوننهيكسيوم	Uuh	116
يوننيليوم	Uun	110
يوننكتيوم	Uuo	118
يوننكاديوم	Quq	114
يونانيوم	Uuu	111
يورانيوم	U	92
فاناديوم	V	23
زينون	Xe	54
يتيربيوم	Yb	70
يتريوم	Y	39
التوتياء (الزنك)	Zn	30
زيركونيوم	Zr	40

يوجد لكل عنصر نظير واحد خاص موجود عادةً في الطبيعة. ولكن، جميع العناصر لها أكثر من نظير، ينـــتج عن تغيّر عدد النيترونات في نواة العنصر إلى اختلاف في كتلة العنصر، وكذلك اختلاف في كثافته. لـــذا، يدعـــى الهيدروجين الذي تحوي نواته على نيترون أو اثنين إلى جانب البروتون *بالهيدروجين الثقيل*. الشكل الطبيعي لليورانيوم الذي يمكن أن يخطر بالبال هو الشكل الذي يملك ثلاثة نيترونات إضافية في نواته مقارنة بالنوع سيء السمعة المستخدم في الأسلحة الذرية.

إن إضافة أو انتزاع النيترونات من نواة العنصر ليس عملاً يجري التفكير به منذ زمن بعيد كإضافة أو انتزاع البروتونات، ولكنها لا تزال مهمة من يعمل في اختصاص فيزياء الطاقة العالية بشكل عام. لا يمكنك أن تأخذ ببساطة بالوناً مملوءاً بالهواء بحيث يشكل النتروجين 78 بالمائة تقريباً منه وتجعله أكثر ضخامة بحقن النيترونات في نوى النتروجين.

الكتلة الذرية

تدعى الكتلة الذرية للعنصر في بعض الأحيان بالوزن الذري وتساوي تقريباً مجموع عدد البروتونات وعـــدد النيتـــرونات في النواة. تقاس هذه الكمية عادةً بوحدات الكتلة الذرية (amu)، حيث إنّ 1 amu يساوي بالضبط 1/12 كتلة نواة نظير الكربون الذي يملك ستة نيترونات. إنه النظير الأكثر شيوعاً للكربون، ويرمز له C^{12} أو الكربون−12. إن الكتلة التقريبية لأي بروتون أو نيترون 1/12 amu ، ولكن كتلة النيترونات أكبر بقليل من كتلة البروتونات.

تُحـــدَد العناصر بشكل وحيد بواسطة أعدادها الذرية، ولكن تعتمد الكتلة الذرية للعنصر على نظير خاص لذلك العنصر. يتواجد النظير المشهور للكربون، C^{14}، بشكل افتراضي بكميات صغيرة جداً في جميع المواد التي تحوي الكربون. أثبتت هذه الحقيقة أنها مفيدة جداً للجيولوجين وعلماء الآثار. إن النظير C^{14} هو عنـــصر مشع، بينما C^{12} ليس عنصراً مشعاً. يضعف النشاط الإشعاعي للعنصر C^{14} بمرور الزمن وفقاً لتابع رياضي مشهور ومعروف مسبقاً. يُمكّن ذلك الباحثين من تحديد زمن تشكيل المُركّبات التي تحوي الكربون وبالتالي اكتشاف عمر الصخور، والمستحثات، والنواتج الصنعية المختلفة.

في الـــتفاعلات النووية القادرة على إنتاج الطاقة، كالتفاعلات التي تحدث داخل النجوم، وفي القنابل الذرية، ومصانع القدرة النووية، يجري دائماً تقديم كمية من الكتلة− ويجري تحويلها إلى طاقة− في المعاملات بين الذرات. يمكن لهذه الكمية من المادة والبالغة الصغر أن تُنتج كمية هائلة من الطاقة. كان ألبرت أينشتاين أول من صاغ هذه العلاقة باستخدام معادلته الشهيرة

$$E = mc^2$$

حـــيث إنّ E هـــو الطاقة المُنتجة بالجول، وm الكتلة الكلية المستهلكة في التفاعل مقدرة بالكيلوغرام، وc ســـرعة الضوء بالمتر بالثانية. إن القيمة c^2 كبيرة جداً: وهي تساوي تقريباً 90 كادريليون متر مربع بالثانية مربع (9×10^{16} m^2/s^2). وذلك سبب إمكانية إنتاج الكثير من الطاقة بواسطة التفاعل الذري بين عيّنتين أوليتين كتلتهما متوسطة.

يشكل موقع الوب التالي مصدراً ممتازاً للمعلومات المتعلقة بجميع العناصر المعروفة، متضمناً العدد الذري، والكتلة الذرية، وخصائص أخرى متنوعة:

http://www.chemicalelements.com/

يُعتبر قضاء فترة في استكشاف هذا الموقع الآن فكرة جيدة إذا كان لديك كمبيوتر مع إمكانية وصول للإنترنت.

مسألة (9-1)

لنفترض أن نواة ذرة الأوكسجين، والتي تحوي ثمانية بروتونات وتحوي عادةً ثمانية نيترونات قد انشطرت إلى نصفين. ما هو العنصر الناتج؟ ما هو عدد ذرات العنصر الذي سيتكوّن؟ أهمل للتبسيط، أي طاقة مساهمة في التفاعل.

حل (9-1)

سينتج عن هذا التفاعل ذرتا بيرليوم بحيث تحوي كل ذرة أربعة بروتونات وأربعة نيترونات. لن يكون العنصر الناتج النظير الأكثر شيوعاً، لأن للبيريليوم عادةً خمسة نيترونات في نواته.

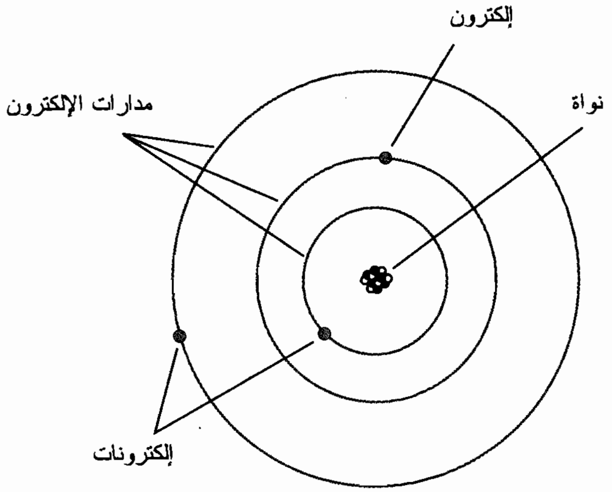
خارج النواة

يحيط بنواة الذرة جسيمات تملك شحنة كهربائية معاكسة لشحنة البروتونات. إنها *الإلكترونات*. يدعو الفيزيائيون الإلكترون اعتباطاً شحنة سالبة والبروتون شحنة موجبة.

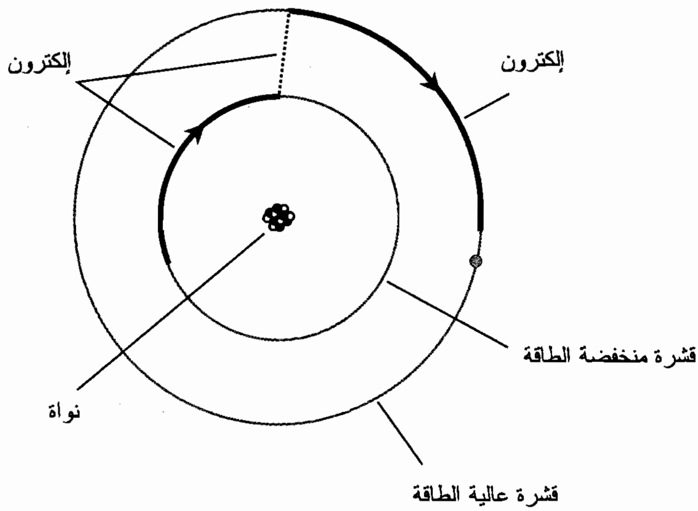
الإلكترون

يملك الإلكترون كمية الشحنة نفسها تماماً التي يملكها البروتون ولكن بقطبية معاكسة. ولكن، كتلة الإلكترونات أصغر بكثير من كتلة البروتونات، سنحتاج إلى 2.000 إلكترون لتكون كتلتهم مساوية إلى كتلة بروتون واحد.

شبهت إحدى النظريات الأولى المتعلقة ببنية الذرة الإلكترونات المُضمّنة في النواة كالزبيب في الكعكة. لاحقاً، جرى تخيّل الإلكترونات وكأنها تدور في مدارات حول النواة، مشبهة كل ذرة بنظام نجمي مصغر حيث شبّهت الإلكترونات بالكواكب (الشكل (9-1)). جرى تعديل هذا التصور بشكل أكبر لاحقاً. في نموذج الذرة اليوم، تتحرك الإلكترونات بحركة سريعة، وترسم أشكالاً مُعقَّدة جداً بحيث يستحيل تحديد موضع أي جسيم في لحظة زمنية ما. إن كل ما يمكن القيام به هو القول بأنه من المحتمل وجود الإلكترون داخل كرة معينة محيطة بالنواة. تدعى هذه الكرات *بالقشرة الإلكترونية*. إن مركز القشرة الإلكترونية هو نواة الذرة. كلما كبر نصف قطر القشرة، كلما كبرت طاقة الإلكترون. يُمثّل الشكل (9-2) رسماً مبسطاً جداً لما يحدث إذا اكتسب إلكترون طاقة كافية "ليقفز" من قشرة إلى قشرة أخرى تُمثّل طاقة أكبر.



الشكل (9-1): نموذج مُبكِّر للذرة، جرى تطويره حوالى العام 1900.



الشكل (9-2): توجد الإلكترونات في مستويات محددة، يقابل كل مستوى طاقة ثابتة ومحددة.

تستطيع الإلكترونات مع ذلك الانتقال بسهولة من ذرة إلى أخرى في بعض المواد. هذه المواد هي *السنواقل الكهربائية*. يصعب في مواد أخرى انتقال الإلكترونات. وتدعى هذه المواد *بالعوازل الكهربائية*. ولكنٍ، على أي حال، يعتبر انتقال الإلكترونات سهلاً جداً مقارنة بانتقال البروتونات. تنتج الكهرباء دائماً تقريباً، من انتقال أو من حركة الإلكترونات في المادة.

يكون عدد الإلكترونات في الذرة بشكل عام، مساوياً لعدد البروتونات. لذا تُلغي الشحنات السالبة تماماً الشحنات الموجبة وتكون الذرة محايدة كهربائياً. ولكن تحت بعض الشروط، من الممكن وجود زيادة

أو نقـــصان في الإلكتـــرونات. تستطيع المستويات العالية من الطاقة المشعة أو الحرارة العالية أو جود حقل كهربائي (سنناقشه لاحقاً) "انتزاع" الإلكترونات الحرة من الذرات، لتُخِّل بهذا التوازن.

الأيونات

إذا كـــان عدد الإلكترونات أكثر أو أقل من عدد البروتونات في ذرة ما، تكتسب هذه الذرة شحنة كهربائية. ينجم عن نقص الإلكترونات شحنة موجبة للذرة؛ وتقدم زيادة الإلكترونات للذرة شحنة سالبة. تبقى هوية العنصر نفسها، أيا تكن الزيادة أو النقصان في الإلكترونات. يمكن في الحالة القصوى انتزاع جميع الإلكترونات من الذرة، لنُبقي فقط على النواة. وسيبقى العنصر الناتج يُمثِّل العنصر نفسه، ولكن، كما كان وكأنـــه يمتلك جميع إلكتروناته. تدعى الذرة المشحونة كهربائياً *بالأيون*. عندما تحوي المادة على الكثير من الأيونات، نقول أن المادة *مؤينة*. إذا كانت الإلكترونات أكثر من البروتونات في الذرة يكون *الأيون سالبًا*. وإذا كانـــت الإلكتـــرونات أقل من البروتونات في الذرة يكون *الأيون موجبًا*. إذا كان عدد الإلكترونات والبروتونات نفسه فالذرة محايدة كهربائياً.

يمكن أن يحدث التأين عند تسخين المادة لدرجات حرارة عالية أو عند وضعها في حقول كهربائية شديدة. يمكـــن أن يحـــدث التأين في المادة أيضاً نتيجة لتعرضها للأشعة فوق البنفسجية، وأشعة x، وأشعة غاما أو نتيجة لتعرضها لجسيمات ذرية جزئية عالية السرعة كالنيترونات، أوالبروتونات، أونوى *الهليوم* أو الإلكترونات يؤين ما يدعـــى *الإشعاع الأيوني* الذي يُدعى غالباً *بالنشاط الإشعاعي* الذرات في النسيج الحي ويمكن أن يسبب المرض، والموت، والتحولات الجينية.

الـــبرق هو نتيجة لتأين الهواء. تحدث الشرارة الكهربائية بسبب تشكل عدد ضخم من الشحنات، تـــؤدي لنشوء قوى على الإلكترونات في الوسط المتداخل. تسحب هذه القوى الإلكترونات بعيداً عن الذرات. تنقل الذرات المؤينة بشكل عام التيارات الكهربائية بسهولة أكبر من الذرات المحايدة كهربائياً. يحـــدث التأين الناتج عن حقل كهربائي قوي في قناة ضيقة *مُتَلَّمة* (مفصصة)، كما رأيت بالتأكيد. بعد لمعـــان البرق، تجذب نوى الذرات الإلكترونات المتناثرة إليها بسرعة، ويصبح الهواء محايداً كهربائياً مرة أخرى.

قد يكون العنصر في الوقت نفسه أيوناً ونظيراً مختلفاً عن النظير العادي. مثلاً، قد تملك ذرة الكربون ثمانية نيترونات بدلاً من ستة والتي تشكل الحالة الطبيعية، وبالتالي يكون النظير C^{14}، ويمكن انتزاع إلكترون منها، مما يعطيها وحدة شحنة كهربائية موجبة ويجعلها أيوناً.

تقل كثافة الغلاف الجوي بزيادة الارتفاع. ونتيجة لذلك تصبح كمية الأشعة فوق البنفسجية وطاقة أشـــعة x المستقبلة من الشمس أكبر وأكبر كلما ازداد الارتفاع. تُصبح غازات الغلاف الجوي على ارتفاع معـــين مؤيـــنة بواسطة الإشعاع الشمسي. تؤلف هذه المناطق *أيونسفير* الأرض. للأيونسفير تأثير هام على انتـــشار أمـــواج الراديو بترددات محددة. تمتص الطبقات المؤينة أو تكسر الأمواج. يجعل ذلك الاتصالات طويلة – المسافة ممكنة باستخدام ما ندعوه حُزم الموجه الراديوية القصيرة.

مسألة (9-2)

افتـــرض أن نواة ذرة الأوكسجين قد انشطرت إلى نصفين تماماً. أهمل كما في المسألة (9-1) أي طاقة يمكن أن تساهم في التفاعل. افترض أن ذرة الأوكسجين الأصلية محايدة كهربائياً، وأنه لم يجر كسب أو فقد أي إلكترون أثناء التفاعل. هل من الممكن أن تكون كلتا الذرتين الناتجتين محايدة كهربائياً؟

حل (9-2)

نعـــم. يجب أن يكون لذرة الأوكسجين الأصلية ثمانية إلكترونات كي تكون محايدة كهربائياً. إذا جرى تقسيم الإلكترونات الثمانية بالتساوي بين ذرتي بيريليوم، سيكون لكل ذرة أربعة بروتونات في الـــنواة، وسيكون لكل من ذرتي البيريليوم عندها أربعة إلكترونات، وستكون كل منهما محايدة كهربائياً.

مسألة (9-3)

خـــذ بالاعتـــبار السيناريو السابق الذي جرى فيه انتزاع إلكترونين من ذرة أوكسجين وأصبحت بالتالي أيوناً موجباً. هل يمكن أن تكون ذرتا البيريليوم الناتجتان محايدتين كهربائياً؟

حل (9-3)

في هـــذه الحالة، لا. يجب أن يكون المجموع الكلي للإلكترونات ثمانية، وذلك كي تكون كل من ذرتي البيريلـــيوم محايدتين كهربائياً. من الممكن أن تكون إحدى ذرتي البيريليوم محايدة، ولكن يجب أن تكون إحداهما على الأقل حيادية.

الطاقة من المادة

يُعرف انقسام نواة الذرة *بالانشطار النووي*. وهو معاكس في المعنى للاندماج النووي، والذي يحدث داخل الشمس والنجوم الأخرى. استخدمت القنابل الذرية الأولى، التي جرى تطويرها في أربعينيات القرن العـــشرين، التفاعلات الانشطارية لإنتاج الطاقة. استخدمت الأسلحة الأكثر قوة، والتي جرى إنشاؤها في خمسينيات القرن العشرين، القنابل الانشطارية لإنتاج الحرارة الضرورية لتوليد اندماج الهيدروجين.

الانشطار الطبيعي والانشطار الناتج عن الإنسان

جـــرى تقديم الأمثلة السابقة التي استلزمت الأوكسجين والبيريليوم لأهداف توضيحية، ولكن تجزئة نـــواة الـــذرة ليـــست عملاً بسيطاً. لا يستطيع الفيزيائي العبث بنواة الذرة وكأنها دمية. يجب أن تحدث التفاعلات النووية تحت شروط معينة والنتائج ليست مباشرة كما تطرح المسائل السابقة.

يُوظَّـــف *مُـــسرِّع الجسيمات* لشطر نواة الذرة في المختبر. تستخدم هذه الآلة الشحنات الكهربائية، والحقول المغنطيسية، والتأثيرات الأخرى لقذف الذرات بجسيمات ذرية جزئية ذات سرعات هائلة لشطرها. تكون النتيجة تفاعلاً انشطارياً، يترافق عادةً بتحرير طاقة بأشكال متنوعة.

تحدث بعض التفاعلات الانشطارية بشكل تلقائي. يمكن أن يحدث تفاعل كهذا ذرة بذرة خلال فترة طويلة من الزمن، كما في حالة الانحلال التلقائي للمعادن ذات النشاط الإشعاعي في البيئة المحيطة. يمكن أن يحدث التفاعل بسرعة ولكن تحت شروط يجري التحكم بها، كما يجري في مصنع القدرة النووية. يمكن أن يحـــدث الـــتفاعل بشكل آني تقريباً وبشكل خارج عن السيطرة، كما في القنبلة الذرية وذلك عند ضغط عيِّنتين من مواد إشعاعية مُعينة وذات كتلتين كافيتين مع بعضهما.

المادة والمادة المضادة

إنّ لكـــل من البروتون والنيترون والإلكترون جسيماً مضاداً له يظهر على شكل *مادة مضادة*. تدعى هذه الجسيمات *بالجسيمات المضادة*. الجسيم المضاد للبروتون هو *البروتون المضاد*؛ والجسيم المضاد للنيترون هو *النيترون المضاد*؛ والجسيم المضاد للإلكترون هو *البوزيترون*. إن كتلة البروتون المضاد هي كتلة البروتون نفسها ولكن بشكل معاكس، وله شحنة كهربائية سالبة مساوية ولكن معاكسة لشحنة البروتون الكهربائية الموجـــبة. إن كـــتلة النيترون المضاد هي كتلة النيترون نفسها، ولكن مرة أخرى بمعنى معاكس. لا يملك لا النيتـــرون ولا النيتـــرون المضاد أي شحنة كهربائية. يملك البوزيترون كتلة الإلكترون نفسها، ولكن بمعنى معاكس، وهو مشحون بشحنة موجبة مساوية بالقيمة المطلقة لشحنة الإلكترون السالبة.

ربمـــا تكون قد قرأت في روايات الخيال العلمي، أو رأيت في السينما أنه عند اصطدام جسيم المادة بالجـــسيم المضاد له، فإنهما يبيدان بعضهما البعض. هذا صحيح. ماذا يعني ذلك بالضبط؟ فعلياً، لا تختفي الجسيمات من الكون، بل تتحول من مادة إلى طاقة. تحررت المادة المُركّبة للجسيم والجسيم المضاد بشكل كامل وفقاً لصيغة أينشتاين ذاتها المُطبَّقة في التفاعلات النووية

$$E = (m_+ + m_-)\, c^2$$

حـــيث إن الحـــرف E هو الطاقة بالجول، وm_+ كتلة الجسيم بالكيلوغرام، وm_- كتلة الجسيم المضاد بالكيلوغرام، وc^2 مربع سرعة الضوء والتي كما تتذكر تساوي تقريباً $9 \times 10^{16}\ m^2/s^2$.

قدرة غير قابلة للتخيل

لـــو أُحـــضرت كميات متساوية من المادة والمادة المضادة، ستتحول الكتلة بكاملها وفق النظرية إلى طاقـــة. إذا حدث وكانت كتلة المادة أكبر من كتلة المادة المضادة، سيبقى بعض المادة بعد المواجهة. بشكل معاكس، إذا حدث وكانت كتلة المادة المضادة أكبر من كتلة المادة، سيبقى بعض المادة المضادة.

يجـــري في المفاعل النووي تحرير جزء طفيف من المادة فقط على شكل طاقة؛ ويبقى دائماً الكثير من المـــادة علـــى الرغم من تغيّر شكلها. قد تدفع بقطعتين من عنصر U^{235}، نظير عنصر اليورانيوم ذو الكتلة الذريـــة 235 amu، وإذا كانـــت كتلتهما المشتركة كبيرة كفاية، سيحصل انفجار ذري. ولكن، ستبقى كمية كبيرة من المادة. يجب أن نقول أن مردود التحويل من مادة إلى طاقة للانفجار الذري منخفض.

في تفاعـــل مـــادة-مادة مضادة، إذا كانت كتل العينات متساوية، فإن مردود التحويل 100 بالمائة.

يمكنك أن تتخيل أن قنبلة مادة–مادة مضادة بكتلة مفرقعة نارية يمكن أن تشكل سلاحاً يُماثل سلاحاً نووياً تقليدياً. يستطيع سلاح واحد مصنوع من مادة–مادة مضادة أن يمسح الحياة بجميع أشكالها على الأرض.

أين توجد جميع المواد المضادة؟

لماذا لا نرى المواد المضادة تسبح في الكون؟ لماذا، مثلاً، كل من الأرض، والقمر، والزهرة، والمريخ مصنوعة جميعها من المادة وليست مصنوعة من المادة المضادة؟ (إذا وُجد جسم سماوي مصنوع من المادة المضادة، إذاً، بمجرد هبوط سفينة الفضاء عليه، فإن السفينة ستختفي بانفجار طاقة ضخم بشكل لا يصدق). إنه سؤال هام. لسنا متأكدين بشكل مطلق من أن جميع النجوم والمجرات التي نراها مصنوعة من المادة. ولكن، نعلم أنه إذا وجدت أي مادة مضادة في جوارنا القريب، فإنها ستكون قد اتحدت منذ زمن بعيد بالمادة وأُبيدت. لو وُجدت أي مادة ومادة مضادة في النظام الشمسي البدائي، فقد كانت كتلة المادة أكبر، وانتصرت بعد الصراع.

إن معظم الفلكيين متشككون من فكرة أن مجرتنا تحوي تقريباً على كميات متساوية من المادة والمادة المضادة. لو كان ذلك هو الحالة، يجب أن نتوقع رؤية انفجارات دورية بتألق غير قابل للتخيل أو حدوث تدفق مستمر للطاقة لا يمكننا شرحه بأي طريقة باستثناء المجابهات بين المادة والمادة المضادة. ولكن، لا يعلم أحد الأجوبة الحقيقية للأسئلة المتعلقة بتكوين المجرات البعيدة، وخاصة العمليات التي تقود بعض أكثر الأجسام الخفية كأشباه النجوم (النجوم الزائفة).

مسألة (9–4)

لنفترض أننا أحضرنا كتلة 1.00 kg من المادة، وكتلة 1.00 kg من المادة المضادة، ووضعناهما مع بعضهما. كم ستكون الطاقة المتحررة؟ هل ستبقى أي مادة أو مادة مضادة؟

حل (9–4)

نستطيع الإجابة عن السؤال الثاني أولاً: لن تبقى أي مادة أو مادة مضادة لأن الكتلتين متساويتان (والعكس صحيح). بالنسبة للقسم الأول من السؤال، إن الكتلة الكلية المنخرطة في المجابهة 2.00 kg وبالتالي يمكننا استخدام صيغة أينشتاين الشهيرة. دعنا نُقرب بالتدوير سرعة الضوء إلى $c = 3.00 \times 10^8$ m/s. للتبسيط إذاً الطاقة E بالجول هي

$$\begin{aligned} E &= mc^2 \\ &= 2.00 \times (3.00 \times 10^8)^2 \\ &= 2.00 \times 9.00 \times 10^{16} \\ &= 1.80 \times 10^{17}\text{J} \end{aligned}$$

إنها كمية كبيرة من الجول. ليس من السهل تصور الحجم الكبير لانفجار الطاقة الذي تمثله لأنه من الصعب تخيل الحجم الكبير للعدد 1.80×10^{17} أو 180 كادريلون. ولكن، يمكن التفكير بكمية الطاقة الممثلة بالعدد 1.80×10^{17} J بدلالة مسألة أخرى.

مسألة (9-5)

نعلم أن $1\ W = 1\ J/s$. إذا أمكن التحكم بالطاقة المُنتجة في تفاعل مادة-مادة مضادة السابق بحيث استخدمت هذه الطاقة لإنارة مصباح ضوئي استطاعته 100 W فما هي مدة إنارة المصباح؟

حل (9-5)

قسِّم كمية الطاقة مقدرة بالجول على استطاعة المصباح مقدرة بالجول بالثانية. نحن نعلم أن ذلك صحيح بدلالة الوحدات

$$J/W = J/(J/s) = J \bullet (s/J) = s$$

تختصر الجول. لاحظ أيضاً استخدام النقطة الصغيرة (.) لتمثيل الضرب عند التعامل مع الوحدات بالمقارنة مع إشارة الضرب المائلة (×) المستخدمة عادةً مع الأعداد. بالتفرغ للأعداد العادية، لتكن P الاستطاعة المستهلكة بواسطة المصباح (100 W)، ولتكن t_s عدد الثواني التي سيضيء فيها المصباح الضوئي W-100، ولتكن E الطاقة الكلية المنتجة بواسطة تفاعل مادة-مادة مضادة، وهي 1.80×10^{17} J. لذلك

$$\begin{aligned} t_s &= E/P \\ &= 1.80 \times 10^{17}/100 \\ &= 1.80 \times 10^{17}/10^2 \\ &= 1.80 \times 10^{15}\,s \end{aligned}$$

إنها مدة طويلة، ولكن ما مدى طولها مقدرة بالسنين مثلاً؟ يوجد 60 ثانية في الدقيقة، و60 دقيقة في الساعة، و24.0 ساعة في اليوم، ويوجد 365.25 يوم في السنة وسطياً. أي يوجد 31,557,600 أو 3.15576×10^7 ثانية في السنة. لتكن t_{yr} الزمن الذي يضيء به المصباح بالسنوات. إذاً

$$\begin{aligned} t_{yr} &= t_s/(3.15576 \times 10^7) \\ &= (1.80 \times 10^{15})/(3.15576 \times 10^7) \\ &= 0.570 \times 10^8 \\ &= 5.70 \times 10^7\,yr \end{aligned}$$

أي 57.0 مليون سنة إذا قربنا الرقم بالتدوير إلى ثلاثة أرقام هامة (أي الأقرب إلى 100,000 سنة)، والتي تشكل الدقة المخولة لنا اعتماداً على بيانات الدخل.

مسألة (9-6)

لنفترض أن كمية المادة في المسألتين السابقتين قد تضاعفت لتبلغ 2.00 kg مع بقاء كمية المادة المضادة نفسها 1.00 kg. ما هي كمية الطاقة المتحررة؟ هل ستبقى أي مادة أو مادة مضادة؟

حل (9-6)

ستبقى كمية الطاقة المتحررة نفسها في الأمثلة الموضحة في المسألتين السابقتين: أي 1.80×10^{17} J.

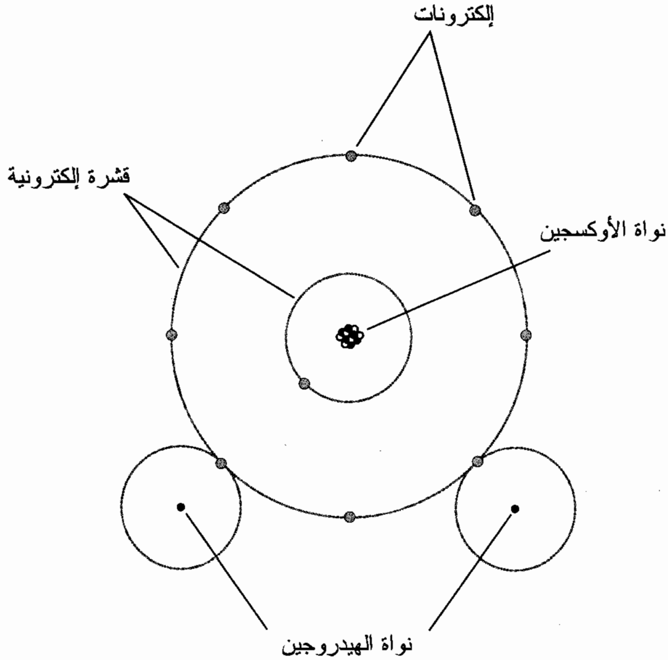
ســيبقى 1.00 kg من المادة (الفرق بين الكتلتين). ولكن، لنفترض أن المجابهة أنتجت انفجاراً، لن تبقى المادة على شكل حجر طوب، بل ستتبعثر في حجم يبلغ ملايين الكيلومترات المكعبة في الفضاء.

المُركَّبات

تستطيع العناصر أن تتحد مع بعضها، لتتشارك الإلكترونات. عندما يحدث ذلك تكون النتيجة *مركباً كيميائــياً*. يُعتــبر الماء أحد أكثر المُركَّبات شيوعاً على الأرض، وهو نتيجة ارتباط ذرتي هيدروجين بذرة أوكسجين. يوجد في الطبيعة آلاف المُركَّبات الكيميائية المختلفة.

ليست مجرد مزيج!

المُركَّب ليس مزجاً للعناصر. ولكن عند مزج العناصر في بعض الأحيان (وإعطاؤها صدمة من الطاقة إذا كــان ذلك ضرورياً)، تنتج مُركَّبات لأن العناصر تخضع *لتفاعل كيميائي* مع بعضها البعض. إذا مزجنا الهيدروجين والأوكسجين، تكون النتيجة غازاً عديم اللون، وعديم الرائحة. ستسبب الشرارة اتحاد الجزيئات مــع بعضها لتشكيل بخار الماء. سيحرر هذا التفاعل الطاقة على شكل ضوء وحرارة. سيحصل انفجار في الــشروط الصحيحة لأن العنصرين يتحدان بشراهة. عند اتحاد ذرات العناصر مع بعضها لتشكيل مُركَّب، تكون الجسيمات الناتجة *جزيئات*. يوضح الشكل (9-3) مخططاً مبسطاً لجزيء الماء.



الشكل (9-3): مخطط مبسط لجزيء الماء.

تظهر المُركّبات عادةً، ولكن ليس دائماً، بشكل مختلف عن أي من العناصر المُكوِّنة لها. يكون كل من الهيدروجين والأوكسجين على شكل غازات في ضغط وحرارة الغرفة. ولكن يكون الماء تحت الشروط نفسها سائلاً. ستُنتج الحرارة التي وصفناها للتو، إذا جرى التفاعل في العالم الحقيقي، بخار ماء بشكل مبدئي، وبخار الماء عبارة عن غاز عديم اللون وعديم الرائحة. ولكن، قد يتكاثف بعض هذا البخار ليتحول إلى ماء سائل إذا انخفضت درجة الحرارة بشكل كاف لتتشكل قطرات الماء. قد تصبح بعض هذه القطرات صلبة، مشكلة ندى متجمداً أو ثلجاً أو جليداً إذاً انخفضت درجة الحرارة لدرجة تحت درجة تجمد الماء.

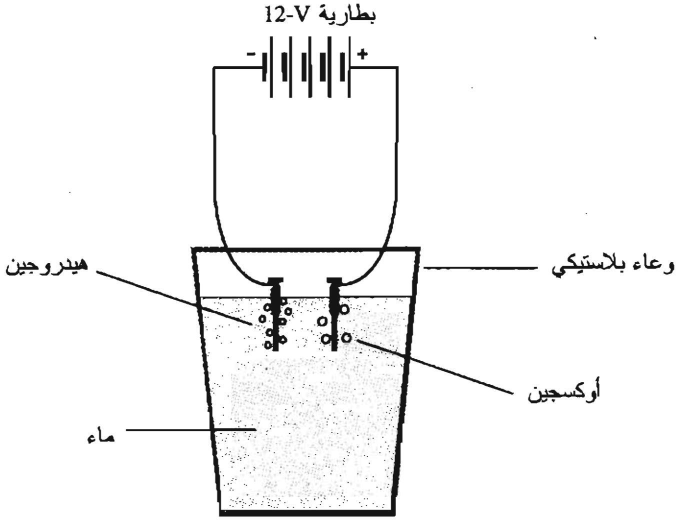
نقطة تحذير: *لا تقم بتجربة كهذه!* لأنه من الممكن أن تصاب بحروق خطيرة. في النهاية، إذا استنشقت كمية كافية من هواء هيدروجين-أوكسجين، ستتضرر رئتاك بحيث قد تموت من جرائها اختناقاً. نقرأ أو نسمع في بعض الأحيان تقارير إخبارية حول المُجرِّبين المنزليين الذين احترقوا نتيجة تجربة كيميائية. لا تكن موضوع إحدى هذه القصص!

الصدأ هو مثال شائع آخر للمُركّب. يتشكل الصدأ عندما يتحد الحديد مع الأوكسجين. الحديد هو جسم صلب ذو لون رمادي باهت، والأوكسجين غاز؛ ولكن صدأ الحديد عبارة عن بودرة بنية أو بودرة حمراء عليه، وهو مختلف تماماً عن العناصر التي شكلته. يحدث التفاعل بين الأوكسجين والحديد ببطء، بشكل يختلف عن اتحاد الهيدروجين والأوكسجين السريع الذي يحدث عند إشعالهما. يمكن تسريع معدل تفاعل حديد - أوكسجين بوجود الماء، ويعلم ذلك كل شخص يعيش في مناخ رطب.

المُركّبات يمكن أن تتفكك

يمكن أن تحدث إجرائية معاكسة لإجرائية اتحاد العناصر في كثير من المُركّبات، ويُعتبر الماء مثالاً جيداً لهذه الإجرائية. عند *تحليل الماء كهربائياً*، فإنه ينفصل إلى غازَي الأوكسجين والهيدروجين.

يمكنك إجراء تجربة *التحليل الكهربائي* في المنزل. اصنع القطبين الكهربائيين (الإلكترودين) من مسمارين كبيرين. قم بلف سلك نحاسي حول كل مسمار بالقرب من الرأس. أضف فنجاناً كاملاً (1/16 من الكالون) من ملح المائدة العادي إلى إناء مملوء بالماء، وقم بحل الملح بشكل كامل لتحويل الماء إلى محلول ذي ناقلية جيدة للتيار الكهربائي. صل الإلكترودين إلى قطبين متعاكسين لبطارية 12-فولط (12 - V) مصنوعة من بطاريتين 6-V أو من ثمان خلايا جافة عادية موصولة على التسلسل. (لا تستخدم بطارية ذات قوة محركة لهذه التجربة). قم بإدخال الإلكترودين في الماء بحيث يكونان بعيدين عن بعضهما بضعة سنتمترات. سترى عندها فقاعات تصعد من كلا الإلكترودين. إن الفقاعات على الإلكترود السالب هي غاز الهيدروجين. والفقاعات على الالكترود الموجب هي غاز الأوكسجين (الشكل (9-4)). من المحتمل أن ترى أن فقاعات الهيدروجين أكثر بكثير من فقاعات الأوكسجين.



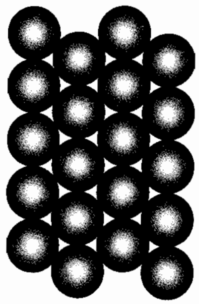
الشكل (9-4): التحليل الكهربائي للماء بحيث تنفصل ذرات الهيدروجين والأوكسجين عن بعضها في المُركَّب.

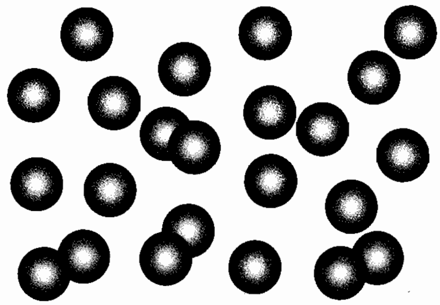
كـن حذراً عند إجراء هذه التجربة. لا تحاول الوصول إلى الدلو وتنـزع الإلكترودين. في الحقيقة، يجـب أن لا تنـزع الإلكترودين أو نهايات البطارية على الإطلاق. إن جهد 12 V الذي تزوده البطارية كافٍ لإحداث صدمة كهربائية مؤذية جداً إذا كانت يداك رطبتين، ويمكن حتى أن تكون خطيرة.

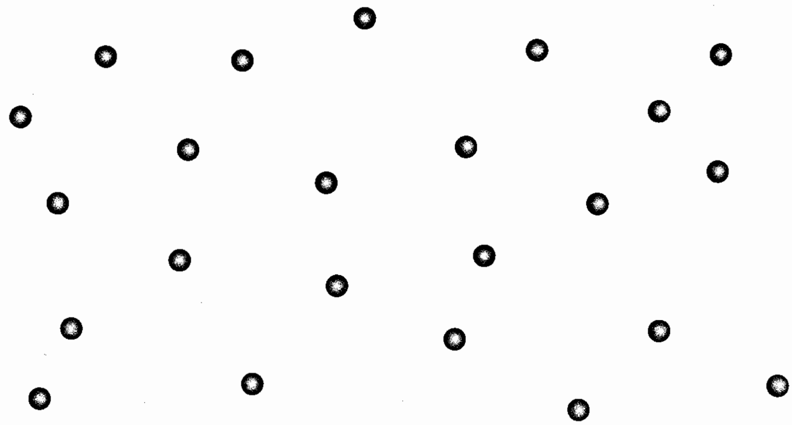
إذا تركت الجهاز الموضح في الشكل (9-4) يعمل لبرهة، ستبدأ بملاحظة تآكل الإلكترودين والسلك المعـرض للتفاعل. سيحدث ذلك على الإلكترود الموجب بشكل خاص، حيث يجري جذب الأوكسجين. تذكـر أنـك أضـفت ملـح المائدة إلى الماء؛ سيؤدي ذلك لجذب أيونات الكلور أيضاً. يتحد كل من الأوكـسجين والكلـور بـسهولة مع نحاس السلك الملفوف على حديد المسمار. إن المُركَّبات الناتجة هي مُركَّبات صلبة وتسعى بعد مدة من الزمن لكساء السلك والمسمار بطبقة. في النهاية، ستتصرف هذه الطبقة كعازل كهربائي وتُخفِّض التيار المتدفق في محلول الماء الملحي.

دائماً في حالة حركة

يوضـح الشكل (9-3) مثالاً لجزيء الماء، الذي يتكون من اتحاد ثلاث ذرات. ولكن، يمكن تشكيل الجـزيئات أيـضاً من ذرتين أو أكثر من العنصر نفسه. غالباً ما يوجد الأوكسجين على شكل أزواج في الغـلاف الجوي للأرض. لذلك يُشار إلى جزيء الأوكسجين في بعض الأحيان بالرمز O_2، حيث تمثل O الأوكـسجين، ويـشير العدد 2 المكتوب بشكل منخفض لوجود ذرتين بالجزيء. يُرمز لجزيء الماء H_2O لوجـود ذرتي هـيدروجين وذرة أوكـسجين واحدة في كل جزيء. تكون ذرات الأوكسجين في بعض الأحـيان بـشكل منفـرد؛ لـذا نشير للجزيء ببساطة بالرمز O. يوجد في بعض الأحيان ثلاث ذرات أوكسجين متحدة مع بعضها. يُدعى هذا الغاز بالأوزون الذي لقي اهتماماً في الأخبار البيئية. ويكتب على الشكل O_3.


(أ)


(ب)


(ج)

الشكل (9-5): توضيح مبسط للجزيئات على شكل جزيئات صلبة (أ)، وسائلة (ب)، وغازية (ج). أظهرنا الجزيئات الغازية بحجم أصغر لأهداف توضيحية فقط.

إن الجــزيئات في حالــة حــركة دائمة. تعتمد سرعة الحركة على الحرارة. كلما ازدادت الحرارة، ازدادت حركة الجزيئات. تكون الجزيئات في الحالة الصلبة متشابكة في نموذج صلب، وعلى الرغم من ذلك فهــي تهتز باستمرار (الشكل (9- 5- أ)). تنــزلق الجزيئات في الحالة السائلة هنا وهناك راجع (الشكل (9- 5- ب)). تنتــشر الجــزيئات في الحالــة الغازية في المكان كله، لتتحد مع بعضها البعض وتتحد مع الأجــسام الــصلبة والــسائلة القريبة. (راجع الشكل (9- 5- ج)). سنبحث الأجسام الصلبة، والسائلة، والغازية بعمق في الفصل التالي.

امتحان موجز

عـــد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. لنفتـــرض أن نظـــير النتـــروجين يحتوي على سبعة إلكترونات وسبعة نيترونات، ما هي الكتلة الذرية التقريبية لهذا العنصر؟
   (a) 7 amu
   (b) 14 amu
   (c) 49 amu
   (d) لا يمكن تحديدها من هذه المعلومات.
2. يـــصطدم جـــسيم غريب x ببروتون، ويبيد كل منهما الآخر في انفجار للطاقة. يمكن أن تستنتج أن الجسيم x
   (a) بوزيترون.
   (b) نيترون.
   (c) إلكترون.
   (d) بروتون مضاد.
3. تكون النيترونات
   (a) مستقرة إذا كانت لوحدها، ولكن تكون غير مستقرة عندما تكون في نوى الذرات.
   (b) غير مستقرة إذا كانت لوحدها ولكن تكون مستقرة عندما تكون في نوى الذرات.
   (c) مستقرة في كافة الشروط.
   (d) غير مستقرة في كافة الشروط.
4. ذرات المُركَّب
   (a) تتشارك نواة واحدة.
   (b) تتشارك البروتونات.
   (c) تتشارك الإلكترونات.
   (d) تتشارك النيترونات.
5. دقّـــق في الـــشكل (9-3). مـــا هو عدد الإلكترونات في الطبقة الخارجية لذرة الأوكسجين عندما تشاركها ذرتا هيدروجين بإلكترون؟
   (a) 2

(b) 6

(c) 8

(d) 10

6. لا يمكن للعناصر المختلفة أن يكون لها العدد نفسه من

(a) البروتونات.

(b) النيترونات.

(c) الإلكترونات.

(d) النوى.

7. يُحدد عدد النيترونات في نواة العنصر

(a) نظير العنصر.

(b) أيون العنصر.

(c) العدد الذري للعنصر.

(d) لا! لا تتواجد النيترونات أبداً في النوى الذرية.

8. كتلة النيترون

(a) أكبر بشكل طفيف من كتلة الإلكترون.

(b) أكبر بكثير من كتلة الإلكترون.

(c) أصغر بشكل طفيف من كتلة البروتون.

(d) أصغر بكثير من كتلة البروتون.

9. افترض أنه لدينا ذرة الأرغون، عددها الذري 18، وتملك 16 إلكتروناً. هذه الذرة عبارة عن

(a) أيون موجب.

(b) أيون سالب.

(c) نظير موجب.

(d) نظير سالب.

10. عندما بدأ العلماء بصقل النظرية الذرية تم اكتشاف 92 نوعاً مختلفاً من الذرات. تُعرف هذه الكيانات الفريدة

(a) بالجزيئات.

(b) بالمُركّبات.

(c) بالنظائر.

(d) بالعناصر.

الفصل 10

الحالات الأساسية للمادة

اعتقد العلماء منذ آلاف السنين، منذ زمن الحضارات الرومانية والإغريقية بأن جميع مواد الكون تتكون من اتحاد أربعة "عناصر" وهي *التراب، والماء، والهواء، والنار*. وفقاً لهذه النظرية، تُعطي النسب المختلفة من هذه "العناصر" المواد خصائصها الفريدة. استخدمت هذه النظرية لتوضيح اختلاف الذهب عن الملح، والذي يختلف بدوره عن الزيت. يبدو ذلك بدائياً بالنسبة لنا، ولكن كانت عقول القدماء حاذقة. كانوا جيدين بشكل خاص في مراقبة الأشياء واستشفاف "الفكرة أو الصورة الكبيرة".

من الممتع تخمين ما كان سيحدث لو أُتيح لهؤلاء العلماء توسيع معرفتهم لتشمل الفترة بين A.D 100 واليوم. ولكن، لم يحدث تقدم غير متعثر كهذا. بعد انحدار الحضارة الرومانية، أصبح العالم الغربي بأكمله تحت نوع من الغيبوبة الجمعية حيث سادت الخرافة والعقيدة الدينية. والأسوأ من ذلك، عُوقب في ذلك النظام المتشدد كل فيلسوف، ورياضي، وعالم عبّر عن رأي مختلف عن الآراء الدينية التقليدية واغتيل بعضهم.

أثناء الحداثة وبعدها، عندما أصبحت المحاكمة العلمية نمط التفكير المُعتبر مرة ثانية، اكتشف علماء الفيزياء وجود أكثر من أربعة عناصر، واكتشفوا أن هذه العناصر لا تشكل المكوِّنات الرئيسية للمادة. ولكن، يوجد ثلاث *حالات أساسية للمادة* يميزها العلماء اليوم. وهي مشابهة بشكل بسيط للعناصر الأصلية الثلاثة. تدعى هذه الحالات أيضاً *بالأطوار* وتعرف *بالجسم الصلب* (مشابه للتراب)، *والسائل* (مشابه للماء)، *والغاز*.

الطور الصلب

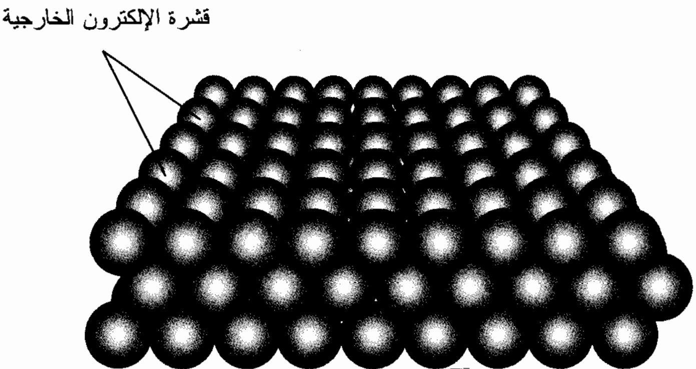
ستحافظ عيِّنة من المادة في طورها الصلب على شكلها إذا لم تتعرض لتأثير عنيف، أو لم تتعرض للضغط، أو لم تتعرض لدرجات حرارة عالية. تُعتبر الصخور، والفولاذ في درجة حرارة الغرفة أمثلة للأجسام الصلبة، وكذلك جليد الماء، والملح، والخشب، والبلاستيك.

القوة الكهربائية

ما الذي يجعل الجسم الصلب يتصرف بهذه الطريقة؟ لماذا عندما نضع كتلة إسمنتية على أرض إسمنتية، لا تغــوص الكتلة في الأرض أو تندمج في الأرض بحيث لا تستطيع لاحقاً إعادة انتزاعها؟ لماذا يُحتمل إذا ضربت جداراً من الطوب بقبضتك فإنك قد تؤذي نفسك بدلاً من أن تخترق قبضتك الجدار؟ يكون داخل الذرات عبارة عن فضاء فارغ بمعظمه؛ وهذا الأمر صحيح حتى في أكثر الأجسام الصلبة كثافة والتي نراها على الأرض. لماذا لا تستطيع الأجسام الصلبة المرور من خلال بعضها كما تفعل المجرات في بعض الأحيان في الفضاء الخارجي أو كما تفعل سُحب الغبار في الغلاف الجوي؟ إنها فضاء فارغ بمعظمه أيضاً ويمكنها أن تمر من خلال بعضها بسهولة.

يكمـــن الجواب على هذا السؤال في طبيعة القوى الكهربائية بين الذرات وما حولها. إن كل نواة في الذرة محاطة "بقشرة- بطبقات" من الإلكترونات المشحونة جميعها بشحنة سالبة. تتنافر دائماً الأجسام ذات الـــشحنات الكهـــربائية المتماثلة القطبية (سالب-سالب أو موجب-موجب). كلما كانت مسافة اقتراب الجـــسمين المتماثلين في الشحنة من بعضهما أصغر كلما ازدادت قوة التنافر. لذلك، حتى لو كان لذرة ما عدد الإلكتـــرونات والبروتونات نفسه أي إذا كانت حيادية كهربائياً، إلا أن الشحنات تتركز في أماكن مختلفة. الشحنة الموجبة محتواة في النواة، وتحيط الشحنة السالبة بالنواة داخل كرة أو أكثر من كرة متحدة المركز.

لنفترض أنك استطعت الهبوط إلى مستوى ميكروي، وأنك وقفت على سطح شريحة عنصر، وليكن هذا العنصر هو الألمنيوم. فماذا كنت سترى؟ سيظهر السطح وكأنه حقل كبير مملوء بكرات السلة (الشكل (10-1)). كنت ستجد أنه يصعب المشي على هذا السطح لأنه غير منتظم. ولكن، كنت ستجد أن جميع الكـــرات تقـــاوم اختراق الكرات الأخرى. الكرات جميعها مشحونة بشحنة سالبة، وبالتالي فإن الكرات ســـتتنافر مع بعضها البعض، إن ذلك سيمنع مرور الكرات داخل بعضها البعض، وسيبقى السطح في حالة مستقرة، وثابتة. ستكون الكرات على الأغلب ذات فضاء فارغ من الداخل، ولكن لا تكون المسافة كبيرة بين الكرات. ستكون محزومة بإحكام تماماً كما في حالة الكرات العادية.



الشكل (10-1): تكون الطبقات الإلكترونية الخارجية لذرات الجسم الصلب محزومة بإحكام. (هذا الرسم مُبسّط بشكل كبير).

إن ما سيلي هو إفراط في التبسيط، ولكن يجب أن يقدم لك فكرة عن السبب الذي يجعل الأجسام لا تمـرّ من خلال بعضها بشكل طبيعي، ولماذا في الحقيقة يقاوم العديد من الأجسام الصلبة الاختراق حتى من قبل سوائل كالماء، أو غازات كالهواء.

الهشاشة، قابلية الطرق، واللدانة

يمكـن لـذرات الأجـسام الصلبة الأولية أن "تتكدس" بطرق متنوعة. إن ذلك واضح في أشكال البلورات التي تلاحظها في العديد من المواد الصلبة المختلفة. للملح مثلاً خاصة الشكل الكريستالي المكعب. وينطبق ذلك على السكر. ولكن، يمكن أن تظهر بلورات الجليد بأشكال متنوعة رائعة ويكون لها دائماً ستة أضلاع، أو ستة محاور، أو ستة وجوه. لا تنحو بعض المواد كالحديد لتشكيل بلورات في الظروف الطبيعية. تنـشق بعـض المواد كالزجاج على طول حدود ناعمة ولكن منحنية. يمكن طحن بعض الأجسام الصلبة للحصول على بودرة ناعمة، بينما تستعصي مواد أخرى على جميع المحاولات الرامية لسحقها.

إن الأجـسام الـصلبة الكريـستالية هشة. لو تعرضت عيِّنة من مادة كهذه إلى ضربة بقوة كافية، ستنكسر أو تتحطم. لا يمكن لهذه الأنواع من الأجسام الصلبة أن تتمدد أو تُسحق أو تتقوس (تنحني) كثيراً دون أن تتكـسر. يُعتـبر الزجاج مثالاً لهذه الأنواع، وذلك على الرغم من إمكانية ملاحظتك بأن قابلية الزجاج للتمدد أو الانحناء صغيرة. يمكن أن تلاحظ مرونة الزجاج إذا شاهدت الانعكاسات من ألواح نافذة كبيرة في يوم عاصف. ولكن، لا يمكنك أن تثني قضيباً زجاجياً مستقيماً ليصبح بشكل الكعكة.

يكـون السلك النحاسي الطري قابلاً للطرق مقارنة بالقضيب الزجاجي (يمكن طرقه وجعله بشكل مسطح) ولدناً (يمكن تمديده وثنيه). ينطبق الأمر نفسه على الذهب إلى حد معين. يُعتبر الذهب أحد أكثر المعادن قابلية للطرق. إنه ثمين ولكن يمكن طرقه وتحويله إلى صفائح بحيث يمكن طلاء أبراج الأبنية بالذهب (تمويهها) دون كسر ميزانية الحكومة. إن الألمنيوم أكثر لدانة وقابلية للطرق من الزجاج، ولكن ليس بدرجة الـنحاس الطري والذهب. يمكن ثني الخشب بدرجات مختلفة اعتماداً على محتواه من الماء، ولكن لا يمكن طرقه وتحويله إلى صفائح رقيقة أو تحويله إلى سلك.

تعـتمد هـشاشة، ولدانـة، وقابلية طرق بعض الأجسام الصلبة على الحرارة. يمكن جعل الذهب والـزجاج أكثـر لدانة وقابلية للطرق بالتسخين. يستفيد نافخ الزجاج المحترف من هذه الظاهرة، ويستفيد كـذلك ضـارب الـنقود، ومصنِّع الأسلاك. ليس للعامل الذي يعمل بالخشب حظ كهذا. إذا سخّنت الخشب،يـصبح جافاً وأقل مرونة. أخيراً، إذا سخّنت الزجاج، أو النحاس، أو الذهب بشكل كاف، فإنه سـيتحول إلى سـائل. سـيبقى الخشب جسماً صلباً إذا قمنا بتسخينه؛ وسيتفحم في درجة حرارة معينة، والتفحم شكل سريع للأكسدة، أي أن الخشب سيحترق.

قساوة الأجسام الصلبة

إن بعـض الأجـسام الصلبة "أكثر صلابة" من الأجسام الأخرى. تُدعى الوسائل الكمية المستخدمة للتعبير عن القساوة *بمقياس موهس* (Mohs)، والذي يُصنِّف الأجسام الصلبة بدرجات من 1 إلى 10. تُمثّل

الأعــداد الأدنى الأجــسام الصلبة الأطرى، وتُمثِّل الأعداد الأعلى الأجسام الصلبة الأقسى. يوضح الجـــدول (10-1) المواد القياسية المستخدمة في مقياس موهس Mohs مع أعداد القساوة الخاصة بها. إن اختـــبار القـــساوة بسيط ويعتمد على مبدأين: (1) تخدش المادة مادة ما أخرى أقل قساوة منها، و (2) لا تخدش المادة أبدا أي مادة أقسى منها.

يعتبر التلك (أو الطلق وهو معدن طري يُستخدم في صناعة ذرور الوجه.. الخ) مثالاً للجسم الصلب الطـــري، حيث يمكن تفتيته باليد. الطبشورة جسم صلب طري آخر. الخشب أقسى إلى حد ما من المادتين السابقتين؟ ومع ذلك فإن الجير أقسى. إذاً مع زيادة درجة القساوة، نجد الزجاج، والكوارتز، والماس. يمكن دائماً تحديد قساوة الجسم الصلب وفقا لخدش عيِّنات منه لعيِّنات أخرى.

تـــتغير أعداد قساوة الكثير من المواد بتغيّر الحرارة. تزداد قساوة هذه المواد في الحالة العامة، بانخفاض درجـــة الحـــرارة، ويشكل الجليد مثالاً جيداً لذلك. إنه جسم صلب طري بشكل واضح في حلبة التزلج، ولكـــن علـــى ســـطح شارون (Charon)، قمر كوكب بلوتو ذو البرد القارس، يكون جليد الماء قاسياً كالصوان (الغرانيت).

الجدول (10-1): مقياس موهس Mohs للقساوة (تُمثِّل الأعداد الأعلى، المواد الأقسى. تُحدَّد القساوة النسبية بمحاولة خدش مادة لمادة أخرى).

اسم العنصر	الرمز الكيميائي	العدد الذري
يوننبيوم	Uub	112
يوننهيكسيوم	Uuh	116
يوننيليوم	Uun	110
يوننكتيوم	Uuo	118
يوننكاديوم	Quq	114
يونانيوم	Uuu	111
يورانيوم	U	92
فاناديوم	V	23
زينون	Xe	54
يتيربيوم	Yb	70
يتريوم	Y	39
التوتياء (الزنك)	Zn	30
الزيركونيوم	Zr	40

تقاس القساوة بالمحافظة على عيِّنات مخبرية لكل من المواد العشر المدونة في الجدول (10-1). يجب أن يــشكل *الخدش* علامة مستمرة، وليس مجرد مجموعة من الجُسيْمات المنقولة من مادة إلى أخرى. تكون قيم قــساوة المــواد عادةً محصورة بين عددين على المقياس. إن مقياس موهس (Mohs) للقساوة ليس دقيقاً، ويفضِّل العديد من العلماء طرقاً أكثر إتقاناً لتحديد وقياس القساوة.

كثافة الأجسام الصلبة

تقاس *كثافة* الجسم الصلب بدلالة عدد الكيلوغرامات المحتواة في متر مكعب. أي تساوي الكثافة إلى الكــتلة مقــسومة على الحجم. تُقاس الكثافة في النظام الدولي (SI) بالكيلوغرام بالمتر المكعب (kg/m^3 أو $kg{\bullet}m^{-3}$). إنهــا وحدة صعبة المراس نوعاً ما في معظم الحالات العملية. تخيَّل أنك تحاول تحديد كثافة حجر رملــي بأخذ قطعة مكعبة من مادة الحجر الرملي بحيث يكون طول حرف هذه القطعة المكعبة 1 m، ووضعها على مقياس مخبري. ستحتاج لرافعة بناء لرفع الجلمود، وسوف يتحطم المقياس.

تُــستخدم في بعض الأحيان وحدة سنتمتر – غرام – ثانية (cgs) بدلاً منها وذلك بسبب لا عملية قياس الكثافة مباشرة بالوحدات الدولية القياسية. إنه عدد الغرامات المحتواة في 1 سنتمتر مكعب (cm^3) من المــادة المــراد حساب كثافتها. تُدعى هذه الوحدة تقنياً: *غرام بالسنتمتر المكعب* (g/cm^3 أو $g{\bullet}cm^{-3}$). للتحويل من غرام بالسنتمتر المكعب إلى كيلوغرام بالمتر المكعب، اضرب بالعدد 1.000. وللتحويل بشكل معاكس اضرب بالعدد 0.001.

يمكــن أن تجزم وبدون شك بأن الأجسام الصلبة كالرصاص كثيفة جداً. الحديد أيضاً كثيف جداً. الألمنيوم ليس كثيفاً جداً. الصخور أقل كثافة من معظم المعادن المعروفة. للزجاج كثافة الصخور السيليكية المصنوعة منها تقريباً. الخشب ومعظم أنواع البلاستيك ليست كثيفة جداً.

مسألة (10-1):

يــبلغ حجم عيِّنة من مادة $45.3\ cm^3$ وكتلتها 0.543 kg. ما هي كثافة هذه العيِّنة مقدَّرة بالغرام بالسنتيمتر المكعب.

حل (10-1)

هــذه المسألة عويصة قليلاً بسبب استخدام نظامين مختلفين من الوحدات، وهما SI للحجم وcgs للكــتلة. للحصول على جواب ذي معنى يجب أن تكون الوحدات متوافقة. تتطلب هذه المسألة التعبير عن الجواب بنظام cgs، وبالتالي تحويل الكيلوغرام إلى غرام. ذلك يعني أنه علينا ضرب رقم الكتلة بالعــدد 1,000 الــذي يعطينا كتلة العيِّنة 543 g. إن تحديد الكثافة بالغرام بالسنتمتر المكعب الآن مسألة حسابية بسيطة: قسِّم الكتلة على الحجم. إذا كانت d الكثافة، و m الكتلة، و v الحجم،

$$d = m/v$$

في هذه الحالة

$$d = 543/45.3 = 12.0\ g/cm^3$$

تم تقريب الجواب بالتدوير إلى ثلاثة أرقام هامة.

مسألة (10−2)

احسب كثافة العيِّنة الواردة في المسألة (10−1) بالكيلوغرام بالمتر المكعب. لا تستخدم عامل التحويل المستخدم في حل المسألة (10−1). ابدأ من البداية.

حل (10−2)

يتطلب ذلك تحويل الحجم إلى وحدات SI، أي إلى متر مكعب. يوجد مليون أو 10^6 سنتيمتر مكعب في المتر المكعب. لذلك، بهدف تحويل هذا الحجم المقاس بنظام cgs إلى حجم مقاس بنظام SI، يجب أن نُقسِّم على 10^6 أو نضرب بالعدد 10^{-6}. ويكون حجم الجسم $45.3 \times 10^{-6}\ m^3$، أو $4.53 \times 10^{-5}\ m^3$ في التدوين العلمي القياسي، يمكننا الآن أن نُقسِّم الكتلة على الحجم مباشرة:

$$d = m/v$$
$$= 0.543/(4.53 \times 10^{-5})$$
$$= 0.120 \times 10^5$$
$$= 1.20 \times 10^4\ kg/m^3$$

وهذا الجواب مقرب بالتدوير إلى ثلاثة أرقام هامة عند إنجاز التقسيم العددي.

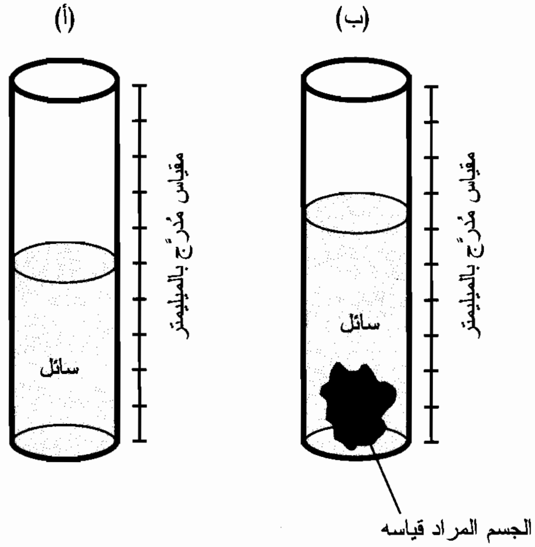
قياس حجم الجسم الصلب

لنفترض أن الجسم في المسألة السابقة غير منتظم. كيف يمكننا أن نعرف أن حجمه $45.3\ cm^3$؟ سوف يكون من السهل إيجاد الحجم إذا كان الجسم كرة كاملة أو مكعباً كاملاً أو موشوراً قاعدته مستطيلة. ولكن افترض أنه جسم صغير غير منتظم؟

ابتكر العلماء طريقة ذكية لقياس أحجام الأجسام الصلبة غير المنتظمة: وهي غمسها في سائل. نقيس أولاً كمية السائل في وعاء (الشكل (10−2−أ)). ثم نقيس كمية السائل المزاحة عندما ينغمس الجسم تماماً. سيظهر ذلك كزيادة في كمية السائل الظاهرة في الوعاء (راجع الشكل (10−2−ب)). واحد ميليمتر من الماء يساوي تماماً $1\ cm^3$، ويُفترض بأي كيميائي جيد أن يكون لديه بعض الأوعية المدرّجة بالمليمترات. إنها طريقة العمل التي ستتبعها ويجب أن لا ينحل الجسم الصلب في السائل وأن لا يمتص الجسم الصلب السائل.

الجاذبية المُميِّزة للأجسام الصلبة

إن الميزة الأخرى الهامة للجسم الصلب هي كثافته بالنسبة لكثافة الماء السائل النقي في درجة الحرارة 4°C (حوالى 39°F). يكون الماء في درجة الحرارة هذه في كثافته القصوى حيث أُسندت له الكثافة النسبية 1. ستغوص المواد ذات الكثافة النسبية الأكبر من 1 في الماء النقي في درجة الحرارة 4°C، وستطفو المواد ذات الكثافة الأصغر من 1 في الماء النقي في درجة الحرارة 4°C. تُدعى الكثافة النسبية للجسم الصلب المحددة بهذه الطريقة *بالجاذبية المميزة*. ستراها عادةً مختصرة على الشكل sp gr وتدعى أيضاً بالكثافة النسبية.



الشكل (10–2): قياس حجم جسم صلب. (أ) وعاء يحوي سائلاً بدون عيّنة؛ (ب) وعاء مع عيّنة مغمورة كلياً بالسائل.

يمكنك بالتأكيد التفكير بالمواد التي يكون أعداد الجاذبية المميزة لها أكبر من 1. تتضمن الأمثلة معظم الصخور وتتضمن افتراضياً معظم المعادن. ولكن يطفو الخفّاف في الماء، وهو صخور بركانية مملوءة بجيوب هوائية. إنّ لمعظم الكواكب، وأقمارها، والكويكبات والنيازك في نظامنا الشمسي أعداد جاذبية مميزة أكبر من 1 باستثناء زحل الذي سيطفو في الماء لو وُجدت بحيرة كبيرة كفاية لاختبار ذلك!

من الطريف أن لجليد الماء جاذبية مميزة أصغر من 1، وبالتالي فهو يطفو في الماء السائل. إن خاصة الجليد هذه أكثر أهمية مما تخيلته في البداية. إنها تسمح للأسماك بالعيش تحت سطوح البحيرات المتجمدة في الشتاء في المناطق المعتدلة والمناطق القطبية على الأرض لأن طبقة الجليد تعمل كعازل في المناخ البارد. لو كانت الجاذبية المحددة للجليد أكبر من 1، فسوف تغوص إلى أعماق البحيرات أثناء شهور الشتاء. سيترك ذلك السطوح معرضة باستمرار إلى درجات حرارة أخفض من درجة التجمد، مسببة تجمد مزيد ومزيد من الماء، وسوف تصبح البحيرات الضحلة جليداً من السطح إلى القعر. ستموت كل الأسماك في هذه البيئة أثناء الشتاء لأنها لن تكون قادرة على اقتطاع الأوكسجين الذي تحتاجه من الجليد الصلب، ولن تكون قادرة على السباحة في هذه البيئة لتغذية نفسها. من الصعب القول كيف ستكون الحياة على الأرض لو كانت الجاذبية المُميِّزة لجليد الماء أكبر من 1.

مرونة الأجسام الصلبة

يمكن تمديد بعض الأجسام الصلبة أو ضغطها بسهولة أكبر من تمديد أو ضغط أجسام صلبة أخرى. يمكن تمديد قطعة من سلك نحاسي مثلاً، إلا أنه يمكن تمديد حبل من المطاط بطول مماثل بشكل أكبر.

ولكن، يوجد فرق في تمديد هاتين المادتين يتعدى مجرد التمدد. لو تركت حبل المطاط بعد تمديده، فسوف يعود لطوله الأصلي، ولكن لو تركت سلك النحاس بعد تمديده فإنه سيبقى في حالته المتمددة.

إن *مـــرونة* المادة هي امتداد لقدرتها على العودة إلى أبعادها الأصلية بعد تعرض عيِّنة منها للتمدد أو الضغط. ووفقاً لهذا التعريف، يتمتع المطاط بمرونة عالية، والنحاس بمرونة منخفضة. لاحظ أن المرونة المعرَّفة بهـــذه الطريقة هي مرونة نوعية (إنها تعبر عن كيفية تصرف المادة) وليست كمية حقيقية (لا نستطيع إسناد رقـــم محدد لها). يستطيع العلماء تحديد المرونة وأحياناً يُعرِّفون المرونة وفقاً لمخطط عددي، ولكن لن نهتم بذلك هنا. من الجدير القول بأنه لا يوجد مادة مرنة بشكل كامل أو مادة غير مرنة بشكل كامل في العالم الحقيقي؛ إن كلاً من هاتين الحالتين النهائيتين مثاليتان نظرياً.

لنفتـــرض أنـــه توجد مادة مرنة بشكل كامل. ستتبع مادة كهذه القانون المتعلق بمدى التمدد الذي تستطيعه أو مدى الضغط الذي تتعرض له عند تطبيق قوة خارجية عليها. يُدعى ذلك *بقانون هوك*: يتناسب مدى تمدد أو انضغاط عيِّنة من أي مادة مع القوة المُطبّقة. رياضياً، إذا كانت F طويلة القوة المطبقة مقدرة بالنيوتن و s مقدار التمدد والانضغاط بالمتر، إذاً

$$s = kF$$

حيث إنّ k عبارة عن ثابت يعتمد على المادة. يمكن كتابة الصيغة السابقة بالشكل الشعاعي على الشكل

$$\mathbf{s} = k\mathbf{F}$$

وذلك للإشارة إلى أن التمدد والانضغاط يحدثان باتجاه القوة المطبقة نفسه.

لا يمكـــن إيجـــاد مادة مرنة بشكل كامل في العالم الحقيقي، ولكن يوجد وفرة من المواد التي تكون مرونتها قريبة من المرونة الكاملة بشكل كاف بحيث يمكن اعتبار قانون هوك صالحاً بالمعنى العلمي، بالإضافة إلى أنه لا يجب أن تكون القوة المطبقة كبيرة جّداً بحيث تُحطِّم أو تكسر العيِّنة المختبرة من المادة.

مسألة (10–3)

تصوّر حبل مطاط مرونته قريبة من المرونة الكاملة إذا لم تتجاوز القوة المطبقة عليه 5.00N. في حالة عدم تطبيق أي قوة يكون طول الحبل 1.00 m. عند تطبيق قوة 5.00 N، يتمدد الحبل ليصبح طوله 2.00 m. ما هو طول الحبل إذا طبقنا قوة 2.00 N؟

حل (10–3)

يـــسبب تطبيق قوة قيمتها 5.00 N زيادة في الطول مقدارها 1.00 m. نحن متأكدون من أن الحبل "مـــرن بـــشكل كامل" إذا لم تتجاوز القوة 5.00 N. لذلك يمكننا حساب الثابت k، الذي يدعى *ثابت النابض*، مقدراً بالمتر بالنيوتن (m/N) من خلال إعادة ترتيب الصيغة السابقة:

$$s = kF$$

$$k = s/F$$

$$k = (1.00\text{ m})/(5.00\text{ N}) = 0.200\text{ m/N}$$

لدينا $F \leq 5.00$ N. لذلك، تصبح الإزاحة كتابع للقوة

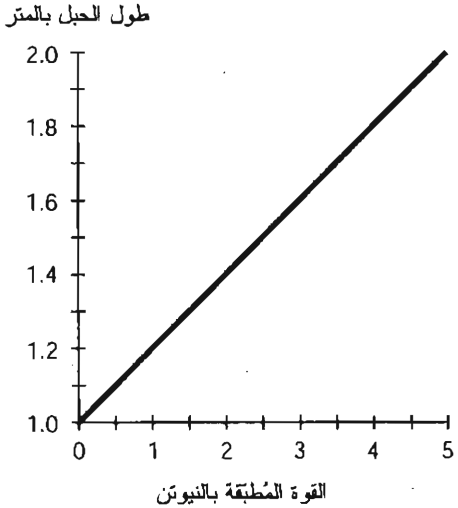
$$s = 0.200\ F$$

وإذا كان $F = 2.00$ N فإن

$$s = 0.200\ \text{m/N} \times 2.00\ \text{N} = 0.400\ \text{m}$$

إنـــه الطول الإضافي الذي "سيزداده" الحبل عند تطبيق قوة 2.00N. وبما أن الطول الأصلي للحبل، دون تطبيق أي قوة هو 1.00 m، سيكون الطول بعد تطبيق القوة 1.400 m = 0.400 m + 1.00 m. نظرياً علينا تقريب هذا العدد بالتدوير ليصبح 1.40 m.

يمكـــن توضيح سلوك هذا الحبل المطاطي، تجاه قوى التمديد التي تتراوح بين 0 وN5.00، رسومياً كمـــا في الشكل (10-3). إنه تابع خطي؛ يظهر كخط مستقيم عند رسمه في الإحداثيات المتعامدة القياسية. إذا تجاوزت قيمة القوة المطبقة N 5.00، ووفقاً للخصائص المميزة لهذا الحبل المطاطي، لن يكـــون لدينا أي ضمانة بأن يبقى تابع الإزاحة بدلالة القوة المطبقة خطياً. أخيراً، إذا كانت طويلة قـــوة الـــتمديد F كـــبيرة بشكل كافٍ، فإن الحبل سوف ينقصم، حيث ستزداد الإزاحة s فجأة وبسرعة إلى قيم غير محددة.



الشكل (10-3): مثال توضيحي للمسألة (10-3). التابع خطي ضمن مجال القوى الموضح هنا.

الطور السائل

تملـــك المـــادة في الحالة السائلة أو في الطور السائل خاصتين تميّزانها عن الطور الصلب. الأولى، يتغيّر شكل السائل بحيث يتوافق مع الحدود الداخلية لأي وعاء يوضع السائل فيه. الثانية، يتدفق السائل الموضوع في وعـــاء مفتوح (كالجرة أو السطل) إلى قاع الوعاء ويشكل سطحاً محدداً. تتصرف عيّنة من السائل بهذه الطريقة في بيئة توجد بها جاذبية.

انتشار السوائل

تخيّل جرة موجودة على متن سفينة فضاء حيث تكون البيئة عديمة الوزن (لا يوجد قوة تسارع). افترض أن الجرة مملوءة بسائل ما، وأنه تم إدخال سائل آخر إلى الجرة لا يتفاعل كيميائياً مع السائل الأول. يمتزج السائلان مع بعضهما حتى يصبح المزيج منتظماً في الجرة بكاملها. تدعى إجرائية المزج هذه *بالانتشار*.

يحدث انتشار السائل ببطء نوعاً ما. تنتشر بعض السوائل بشكل أسرع من سوائل أخرى. تنتشر الكحول في الماء في درجة حرارة الغرفة بشكل أسرع من انتشار زيت المحركات الثقيل في زيت المحركات الخفيف. ولكن عند مزج أي سائلين (شريطة عدم تفاعلهما كيميائياً مع بعضهما كما يتفاعل الأسيد مع الأساس)، سيصبح المزيج في النهاية منتظماً في كامل وعاء محدود الحجم. يحدث ذلك دون الحاجة لهز الوعاء لأن جزيئات السائل دائماً في حالة حركة، وتسبب هذه الحركة بالفعل تصادم وتدافع هذه الجزيئات مع بعضها حتى تمتزج بانتظام.

لو أجريت هذه التجربة في سطل على الأرض حيث توجد قوة التسارع الناتجة عن الجاذبية، سيحدث الانتشار ولكن ستغوص السوائل "الأثقل" باتجاه القعر وسترتفع السوائل "الأخف" باتجاه السطح. ستطفو الكحول مثلاً على سطح الماء. ولكن، لن يكون "السطح" بين الكحول والماء محدداً بشكل واضح، كالسطح بين الماء والهواء. يحاول السائلان المتحركان باستمرار الامتزاج. ولكن، تمنع الجاذبية المزيج من أن يصبح منتظماً في السطل بأكمله إذا لم تكن كثافة السائلين متماثلة تماماً. سنتحدث عن كثافة السوائل باقتضاب.

لزوجة السوائل

تكون بعض السوائل "لزجة" أكثر من بعض السوائل الأخرى. نعلم أنه يوجد فرق بين الماء وبين دبس السكر السميك في درجة حرارة الغرفة. لو ملأت كأساً بالماء وملأت كأساً أخرى بكمية مساوية من دبس السكر ثم أفرغت محتويات كل من الكأسين في البالوعة. ستفرغ الكأس التي تحوي الماء بشكل أسرع. نقول إن *لزوجة* دبس السكر أعلى من *لزوجة* الماء في درجة حرارة الغرفة. يكون الفرق في اليوم الحار، أقل وضوحاً منه في اليوم البارد، وذلك إذا لم يكن لديك بالطبع تكييف يحافظ على ثبات درجة حرارة المنزل بشكل دائم.

تكون بعض السوائل لزجة أكثر بكثير من دبس السكر السميك. يُعتبر القار (القطران) الساخن سائلاً عالي الكثافة عند صبه لإنشاء طريق رئيسي جديد. وجيلي البترول الحار هو مثال آخر. تحقق هذه المواد المعايير المحددة أعلاه كي تُقيَّم كسوائل، حتى لو كانت سميكة للغاية. تصبح هذه المواد مع انخفاض درجة الحرارة أقل وأقل تشابهاً مع السوائل. يستحيل حقيقةً رسم خط دقيق بين الأطوار السائلة والصلبة لأي من هاتين المادتين. إنها لا تشبه الماء؛ إنها لا تتجمد لتصبح على شكل جليد وتتغيّر حالتها بشكل واضح. أين سنرسم الخط الفاصل بين الحالة السائلة والصلبة عندما يبرد القار الساخن؟ كيف نستطيع أن نقول، "الآن هذه المادة سائلة"، ونقول بعد ثانية واحدة، "الآن هذه مادة صلبة"، ونكون متأكدين من نقطة الانتقال بشكل دقيق؟

سائل أم صلب

لا يوجد دائماً جواب محدد عن السؤال، "هل هذه المادة سائلة أم صلبة؟" يمكن أن تعتمد على مرجعية المُلاحظ. يمكن اعتبار بعض المواد صلبة بالمعنى الزمني قصير الأمد ولكنها سائلة بالمعنى الزمني طويل الأمد. تُشكّل طبقة الماغما في الأرض مثالاً لذلك، وهي الطبقة الواقعة بين القشرة والنواة. تعرف أجزاء القشرة بالمعنى الزمني طويل الأمد *بالصفائح التكتونية*، وتعوم طبقة الماغما السائلة الساخنة كالزبد فوق الراقود (وعاء ضخم للسوائل يستخدم للتكرير أو التخمير أو الصباغة أو الدباغة). يظهر ذلك كانجراف قاري وقد ظهر بارتقاء الأرض عبر فترات زمنية بلغت ملايين السنين. من لحظة لأخرى، وحتى من ساعة إلى ساعة أو من يوم إلى يوم، تبدو القشرة وكأنها مثبتة بصلابة على طبقة الماغما. تتصرف طبقة الماغما كجسم صلب بالمعنى قصير الأمد، ولكنها تتصرف كسائل بالمعنى بعيد الأمد.

تخيل أننا استطعنا تحويل أنفسنا لمخلوقات تمتد حياتها لتريليونات السنين (وحدات 10^{12}) بحيث يبدو مرور مليون سنة وكأنه ثانية. إذاً من وجهة نظرنا، ستتصرف طبقة الماغما كسائل منخفض اللزوجة كما يبدو الماء لنا في الحالة الفعلية لمعرفتنا الزمنية. لو استطعنا أن نصبح مخلوقات تستمر حياتها الكلية لجزء صغير من الثانية، فإن الماء سيبدو لنا وكأنه استغرق عدداً لا نهائياً من السنين ليخرج من الإناء الزجاجي عند سكبه، وكنا سنستنتج أن هذه المادة صلبة، أو سائلة بلزوجة عالية جداً.

يمكن أن تعتمد الطريقة التي نحدد بها حالة المادة على الحرارة، ويمكن أن تعتمد أيضاً على الإطار الزمني الذي نراقب المادة فيه.

كثافة السوائل

تُعرَّف كثافة السوائل بثلاث طرق: *الكثافة الكُتليّة، والكثافة الوزنية، والكثافة الجُسيْمية*. قد يبدو الفرق بين هذه الكميات دقيقاً نظرياً، ولكنه يظهر في الحالات العملية.

تُعرَّف الكثافة الكُتليّة لعيِّنة من السائل بدلالة عدد الكيلوغرامات بالمتر المكعب (kg/m^3). تُعرَّف الكثافة الوزنية بالنيوتن بالمتر المكعب (N/m^3) وتساوي إلى الكثافة الكُتليّة مضروبة بالتسارع الذي تخضع له العيِّنة مقدراً بالمتر بالثانية مربع (m/s^2). تُعرَّف الكثافة الجُسيْمية بعدد مولات الذرات بالمتر المكعب (mol/m^3) حيث إن 1 مول $\approx 6.02 \times 10^{23}$.

لتكن d_m الكثافة الكُتليّة لعيِّنة من سائل (بالكيلوغرام بالمتر المكعب)، ولتكن d_w الكثافة الوزنية (بالنيوتن بالمتر المكعب)، ولتكن d_p الكثافة الجُسيْمية (بالمول بالمتر المكعب). لتكن m تُمثّل كتلة العيِّنة بالكيلوغرام، ويُمثّل V حجم العيِّنة (بالمتر المكعب)، ولتكن N تُمثّل عدد مولات الذرات في العيِّنة. ليكن a التسارع الذي تخضع له العيِّنة (بالمتر بالثانية مربع). وبالتالي فإن المعادلات التالية صحيحة:

$$d_m = m/V$$

$$d_w = ma/V$$

$$d_p = N/V$$

تـــستخدم التعاريف البديلة للكثافة الكُتليّة، والكثافة الوزنية، والكثافة الجُسيْمية اللتر كوحدة قياسية للحجم والذي يساوي ألف سنتمتر مكعب ($1000\ cm^3$) أو جزء من ألف جزء من المتر المكعب ($0.001\ m^3$). سترى من وقت لآخر السنتيمتر المكعب (cm^3)، والذي يُعرف أيضاً بالميلي لتر لأنه يساوي 0.001 لتر، مستخدماً كوحدة قياسية للحجم.

إنها تعاريف مبسطة لأنها تفترض أن كثافة السائل منتظمة في العيِّنة بكاملها.

مسألة (10-4)

عيِّنة من سائل حجمها $0.275\ m^3$. كتلتها 300 kg. ما هي كثافتها الكُتليّة بالكيلوغرام المكعب؟

حل (10-4)

ذلك واضح لأن كميات الدخل معطاة مسبقاً بالنظام الدولي SI. لا حاجة لتحويلها من الغرام إلى الكيلوغـــرام، أو مـــن ميلي لتر إلى متر المكعب، أو أي شيء من هذا القبيل. يمكننا ببساطة تقسيم الكتلة على الحجم:

$$d_m = m/V$$
$$= 300\ kg/0.257\ m^3$$
$$= 1090\ kg/m^3$$

نحن مُطالبون بثلاثة أرقام هامة هنا لأن أرقام الدخل معطاة بثلاثة أرقام هامة.

مسألة (10-5)

يـــبلغ تسارع الجاذبية على سطح الأرض $9.81\ m/s^2$، ما هي الكثافة الوزنية لعيِّنة السائل المذكورة في المسألة (10-4)؟

حل (10-5)

إن كل ما نحتاج له في هذه الحالة هو ضرب جوابنا الخاص بالكثافة الكُتليّة بالعدد $9.81\ m/s^2$. هذا يعطينا

$$d_w = 1090\ kg/m^3 \times 9.81\ m/s^2$$
$$= 10{,}700\ N/m^3 = 1.07 \times 10^4\ N/m^3$$

لاحـــظ هنا الفرق بين الحرف الكبير غير المائل N، والذي يُمثِّل نيوتن، والحرف الكبير المائل *N*، والذي يُمثِّل عدد مولات الذرات في العيِّنة.

قياس حجم السائل

يُقـــاس حجـــم عيِّـــنة من السائل عادةً بواسطة أنبوب اختبار أو قارورة مُدرّجة بالميلي لتر أو اللتر. ولكـــن، تـــوجد طريقة أخرى لقياس حجم عيِّنة من السائل، وذلك بمعرفتنا لتركيبتها الكيميائية ومعرفتنا للكـــثافة الوزنـــية لعيِّنة المادة. يجري ذلك بوزن عيِّنة من السائل وتقسيم الوزن على الكثافة الوزنية. يجب

بالطبع الانتباه وبحذر للوحدات. يجب وبشكل خاص التعبير عن الوزن بالنيوتن، والذي يساوي إلى الكتلة مقدرة بالكيلوغرام مضروبة بتسارع الجاذبية ($9.81\ m/s^2$).

دعـــنا نـــنفذ تمرين رياضي لنرى كيفية قياس الحجم بهذه الطريقة. لتكن d_w الكثافة الوزنية المعروفة لعيِّـــنة ضـــخمة من السائل الكبير جداً بحجمه الذي لا نستطيع قياسه باستخدام قارورة أو أنبوب اختبار. افترض أن وزن هذه المادة w مقدرٌ بالنيوتن. إذا كان V الحجم بالمتر المكعب، نعلم من الصيغة السابقة أن

$$d_w = w/V$$

وأن $w = ma$، حيث إن a يمثّل تسارع الجاذبية. إذا قسمنا طرفي المعادلة على w، نحصل على

$$d_w/w = 1/V$$

وبقلب طرفي المعادلة ومبادلة الطرف الأيمن والأيسر نحصل على

$$V = w/d_w$$

كـــل ما قمنا به قائم على افتراض أن V، وw، وd_w كميات غير صفرية. إن ذلك صحيح دائماً في العالم الحقيقي؛ تشغل جميع المواد بعض الحجم على الأقل، ولها بعض الكتلة على الأقل بسبب الجاذبية، ولها بعض الكثافة لوجود بعض "المادة" في كمية متناهية من الفضاء الفيزيائي.

الضغط في السوائل

هل قرأت أو سمعت أنه لا يمكن ضغط الماء السائل؟ ذلك صحيح بالمعنى المبسط، ولكن ذلك لا يعـــني أن الماء السائل لا يقوم بالضغط. تضغط السوائل وتتعرض للضغط، ويمكن أن يخبرك بذلك أي شـــخص تعرض لطوفان أو لإعصار، أو يمكن أن يخبرك بذلك أي غواص. يمكنك تجربة "ضغط الماء" بنفـــسك بالغوص بضعة أقدام في حوض سباحة ملاحظاً الإحساس الذي يولده الماء عندما يضغط على طبلات الأذن.

يتناســـب ضـــغط الموائع المحدد بدلالة القوة بوحدة السطح، طرداً مع العمق. ويتناسب الضغط أيضاً طرداً مع الكثافة الوزنية للسائل. لتكن d_w الكثافة الوزنية للسائل (بالنيوتن بالمتر المكعب)، وليكن s العمق تحت السطح (بالمتر). إذاً يُعطى الضغط P (بالنيوتن بالمتر المربع)

$$P = d_w s$$

إذا أُعطينا الكثافة الكُتليّة d_m (بالكيلوغرام بالمتر المكعب) بدلاً من الكثافة الوزنية، تصبح الصيغة

$$P = 9.81\ d_m s$$

مسألة (10-6)

تكون الكثافة الكُتليّة للماء السائل عادةً $1000\ kg/m^3$. ما هي القوة المؤثرة على السطح الخارجي لمكعب طول حرفه $10.000\ cm$ مغمور في الماء على عمق $1.00\ m$ تحت سطح الماء؟

حل (6-10)

أولاً، احسب مساحة السطح الكلي للمكعب. إن طول حرفه 10.000 cm، أو 0.10000 m، وبالتالي تكون مساحة وجه المكعب $0.10000\ m \times 0.10000\ m = 0.010000\ m^2$. يوجد ستة وجوه للمكعب، لذا تكون مساحة السطح الكلي للمكعب $0.010000\ m^2 \times 6.0000 = 0.060000\ m^2$. (لا تسخط من الأصفار "الإضافية" هنا. إنها هامة. تشير الأصفار إلى أنه جرى تحديد طول حرف المكعب بخمسة أرقام هامة).

ثم أوجد الكثافة الوزنية للماء (بالنيوتن بالمتر المكعب). وهي تساوي إلى 9.81 أضعاف الكثافة الكُتلـيّة، أو $9{,}810\ N/\ m^3$. والشكل الأفضل للتعبير عنه هو $9.81 \times 10^3\ N/m^3$ لأننا أُعطينا تسارع الجاذبية الأرضية بثلاثة أرقام هامة، والتدوين العلمي يجعل هذا حقيقة واضحة. لنترك هذه المسألة ولنعد إلى تدوين قوة العدد 10 وبالتالي لن نقع في فخ الطلب المفاجئ لمزيد من الدقة المخولة لنا.

يقع المكعب على عمق 1.00 m، وبالتالي يكون ضغط الماء في ذلك العمق $9.81 \times 10^3\ N/m^3 \times 1.00\ m = 9.81 \times 10^3\ N/m^2$. إذاً تكون القوة F (بالنيوتن) المطبقة على المكعب مساوية لهذا العدد مضروبا بمساحة سطح المكعب:

$$F = 9.81 \times 10^3\ N/m^2 \times 6.00000 \times 10^{-2}\ m^2$$
$$= 58.9 \times 10^1\ N = 589\ N$$

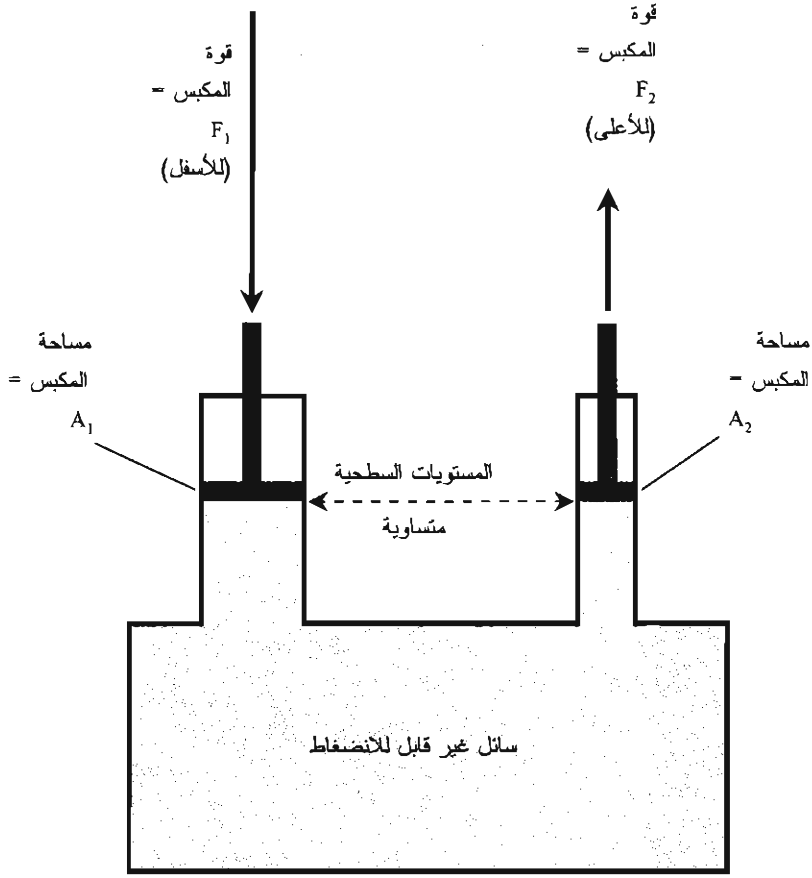
قانون باسكال للسوائل غير القابلة للانضغاط

تخيل وعاء صلباً مانعاً لتسرب الماء. افترض وجود أنبوبين بأقطار غير متساوية مفتوحين للأعلى ومغموسين في هذا الوعاء. تخيل أنك تملأ الوعاء بسائل غير قابل للانضغاط كالماء بحيث يُملأ الوعاء بالماء بشكل كامل ويخرج الماء جزئياً للأعلى من الأنبوبين. افترض أنك وضعت مكابس في هذه الأنابيب بحيث تسد الأنابيب، وتركت المكابس تستقر فوق سطح الماء (الشكل (10-4)).

بما أن أقطار الأنابيب غير متساوية، فإن مساحة سطوح المكابس مختلفة. مساحة أحد المكابس A_1 (بالمتر المربع)، والمكبس الثاني مساحته A_2. افترض أنك ضغطت للأسفل المكبس رقم 1 (مساحته A_1) بقوة F_1 (بالنيوتن). ما مقدار القوة F_2 الناتجة على المكبس رقم 2 (الذي مساحته A_2)؟ يوفر *قانون باسكال* الجواب: تتناسب القوى طرداً مع مساحات سطوح المكابس المماسة للسائل. في المثال الموضح في الشكل (10-4)، المكبس رقم 2 أصغر من المكبس رقم 1، وبالتالي تكون القوة F_2 أصغر من القوة F_1 بالتناسب. رياضياً، المعادلتان التاليتان صحيحتان:

$$F_1/F_2 = A_1/A_2$$
$$A_1F_2 = A_2F_1$$

عند استخدام أي من هذه المعادلات، يجب أن تكون الوحدات متوافقة أثناء إجراء الحسابات. بالإضافة لذلك. تكون المعادلة الأولى ذات معنى فقط إذا كانت القوة المطبقة غير صفرية.



الشكل (10-4): قانون باسكال للسوائل الصنيعة، غير القابلة للانضغاط.القوى متناسبة طرداً مع مساحات المكابس.

مسألة (10-7)

افترض أن مساحات المكابس الموضحة في الشكل (10-4) هي $A_1 = 12.00\ \mathrm{cm}^2$ و $A_2 = 15.00\ \mathrm{cm}^2$. (لا يبدو ذلك متفقاً مع المثال التوضيحي، حيث يبدو المكبس رقم 2 أصغر من المكبس رقم 1، ولكن انسَ ذلك أثناء حل هذه المسألة). لو ضغطت المكبس رقم 1 للأسفل بقوة 10.00 N ما هي القوة الصاعدة الناتجة على المكبس رقم 2؟

حل (10-7)

أولاً، قد تفكر أنه لحل هذه المسألة علينا تحويل مساحات المكابس إلى الأمتار المربعة. ولكن، يكفي في هذه الحالة، إيجاد نسبة المساحات المعطاة بالوحدات نفسها:

$$A_1/A_2 = 12.00\ \mathrm{cm}^2/15.00\ \mathrm{cm}^2$$

$$= 0.8000$$

حتى هذه النقطة نعلم أن $F_1/F_2 = 0.8000$. ولدينا $F_1 = 10.00\ N$، لذا من السهل حساب F_2:

$$10.00/F_2 = 0.8000$$

$$1/F_2 = 0.08000$$

$$F_2 = 1/0.08000 = 12.50\ N$$

نحن مُطالبون بأربعة أرقام هامة في عملية الحساب هذه لأنه جرى تقديم جميع بيانات الدخل بدرجة الدقة هذه.

الطور الغازي

يشبه الطور الغازي للمادة الطور السائل من حيث إن الغاز سيتكيف مع حدود الوعاء أو الإناء. ولكنَّ تأثر الغاز بالجاذبية أقل بكثير من تأثر السائل. إذا ملأت زجاجة ما بالغاز، لا يوجد سطح مُميِّز للغاز. الاختلاف الآخر بين الغازات والسوائل هو حقيقة أن الغازات قابلة للانضغاط بشكل عام.

كثافة الغاز

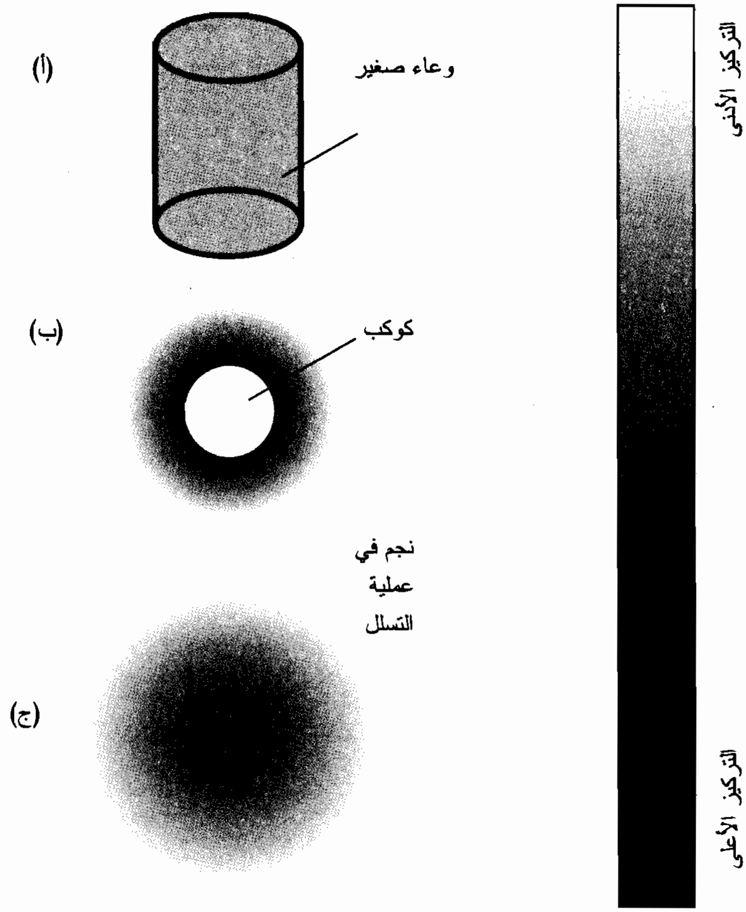
يمكن تعريف الغاز بثلاث طرق، على غرار السوائل تماماً. تُعرَّف الكثافة الكُتليّة بدلالة عدد الكيلوغرامات بالمتر المكعب (kg/m^3) التي تحويها عيِّنة من الغاز. تُعرَّف الكثافة الوزنية بالنيوتن بالمتر المكعب (N/m^3) وتساوي إلى الكثافة الكُتليّة مضروبة بالتسارع الذي تخضع له العيِّنة مقدراً بالمتر بالثانية مربع (m/s^2). تُعرَّف الكثافة الجُسَيْمية بعدد مولات الذرات بالمتر المكعب (mol/m^3) في حيز أو عيِّنة من الغاز حيث إن $1\ mol \approx 6.02 \times 10^{23}$.

الانتشار في الأوعية الصغيرة

تخيّل وعاء مغلقاً صلباً كجرة زجاجية جرى تخليتها من الهواء. افترض أنه تم وضع الجرة في مكان ما في الفضاء الخارجي، بعيداً عن تأثيرات جاذبية النجوم والكواكب. وحيث إن الفضاء نفسه قريب من الفراغ (مقارنة بالأوضاع على الأرض). افترض أن درجة الحرارة هي نفسها درجة الحرارة المنزلية. افترض الآن أنه جرى ضخ كمية محددة من غاز أولي إلى الجرة. يتوزع الغاز لوحده بسرعة في كامل الجرة.

افترض الآن أنه تم إدخال غاز آخر لا يتفاعل كيميائياً مع الغاز الأول في الحجرة ليمتزج مع الغاز الأول. تحدث عملية الانتشار بسرعة، ويكون المزيج منتظماً في كامل الوعاء المغلق بعد فترة قصيرة. يحدث الانتشار بسرعة لأن ذرات الغاز تتحرك بسرعة، وتصطدم عادةً مع بعضها وتكون حركتها نشيطة جداً بحيث تنتشر داخل أي وعاء ذي حجم معقول (الشكل (10-5-أ)).

ماذا سيحدث لو جرت التجربة نفسها بوجود حقل الجاذبية؟ كما تظن، ستستمر الغازات بالامتزاج داخل الجرة. يحدث ذلك مع جميع الغازات في الأوعية ذات الحجم المعقول.



الشكل (10-5): (أ) توزع الغاز داخل الوعاء. (ب) توزع الغاز حول كوكب له غلاف جوي. (ج) توزع الغاز في نجم أثناء تشكله. يشير الظل الداكن إلى التركيز العالي.

تستكون الأغلفة الجوية للكواكب من مزيج من غازات متنوعة. يشكل النتروجين 78 بالمائة تقريباً من غازات الغلاف الجوي على سطح كوكبنا، ويشكل الأوكسجين 21 بالمائة، وتتكون نسبة 1 بالمائة من الكثير من الغازات الأخرى، متضمنة الأرغون، وثاني أكسيد الكربون، وأول أكسيد الكربون، والهيدروجين، والهيليوم، والأوزون (جزيئات الأوكسجين بثلاث ذرات بدلاً من جزيئات الأوكسجين العادية بذرتين)، وكميات طفيفة من بعض الغازات التي ستكون سامة إذا كانت ذات تراكيز عالية، كالكلور والميتان. تمتزج هذه الغازات بانتظام في الأوعية ذات الحجم المعقول، وذلك على الرغم من أن ذرات بعض هذه الغازات أثقل من ذرات الغازات الأخرى. يكون الانتشار، مرة أخرى، هو المسؤول عن ذلك.

الغازات بالقرب من الكوكب

تخـيل الآن غلافـاً غازيـاً يحيط بكوكب كبير بشكل معقول، ككوكب الأرض. تنجذب بعض الغـازات في الفـضاء المحـيط بفعل الجاذبية. يجري قذف غازات أخرى من داخل الكوكب أثناء النشاط الـبركاني. ويـستمر إنتاج غازات أخرى عبر الأنشطة الحيوية (البيولوجية) للنباتات والحيوانات، إذا كان الكـوكب يكتنف حياة. في حالة الأرض، يجري إنتاج بعض الغازات من خلال النشاط الصناعي وحرق الوقود.

تـسعى جميع الغازات في الغلاف الجوي للأرض إلى الانتشار، ولكن بسبب "الفضاء الخارجي" غير المنتهي ووجود كمية محدودة من الغازات، وكون جاذبية الأرض أكبر بالقرب من السطح منها في الفضاء الأبعـد، يحدث الانتشار بطريقة مختلفة داخل الوعاء الصغير. يكون تركيز جزيئات الغاز (الكثافة الجزيئية) بالقـرب مـن السطح كبيراً، وينخفض هذا التركيز بزيادة الارتفاع (راجع الشكل (10-5-ب)). ينطبق الأمر نفسه على عدد الكيلوغرامات بالمتر المكعب في الغلاف الجوي، أي الكثافة الكُتليّة للغاز.

يحـدث عامـل آخـر على مستوى الغلاف الجوي للأرض. بالنسبة لكمية معلومة من الذرات أو الجـزيئات بالمتر المكعب، تكون بعض الغازات أكبر كتلة من الغازات الأخرى. الهيدروجين هو الأصغر كتلة؛ والهلـيوم خفيف أيضاً. الأوكسجين أكثر كتلة منهما، وثاني أكسيد الكربون أكثر كتلة من الأوكسجين. تسعى الغازات الأكثر كتلة إلى الغوص باتجاه السطح، بينما تسعى الغازات الأقل كتلة إلى الصعود للأعلى، وتخرج بعض ذراها إلى الفضاء الخارجي أو تخرج الغازات التي لا يجري دائماً أسرها بواسطة الجاذبية الأرضية.

لا يـوجد حدود مميزة، أو طبقات، مُكوَّنة من نوع واحد من الغازات في الغلاف الجوي. بدلاً من ذلـك، تكون عمليات العبور تدريجية وغير واضحة. إن ذلك جيد. لأنه لو حدث ذلك بطريقة معينة، لن يكـون لدينا على السطح هنا أي أوكسجين. بل سنختنق نتيجة الغازات السامة كثاني أكسيد الكربون أو ثاني أكسيد الكبريت.

الغازات في الفضاء الخارجي

كـان يُعـتقد أن الفضاء الخارجي عبارة عن خلاء تام. ولكن ذلك ليس صحيحاً. يوجد الكثير من المـواد في الفـضاء الخارجي، ومعظمها غاز الهيدروجين والهيليوم. (يوجد أيضاً آثار لكميات من الغازات الأثقل، ويوجد بعض الصخور الصلبة وقطع الجليد أيضاً). تتفاعل جميع الذرات في الفضاء الخارجي جاذبياً مع جميع الغازات الأخرى. من الصعب تخيل ذلك في البداية، ولكن لو فكرت به، لن يصعب عليك. حتى ذرة الهيدروجين الواحدة ستؤثر بقوة تجاذب على ذرة أخرى تبعد عنها مليون كيلومتر.

تكون حركة الذرات في الفضاء الخارجي عشوائية تقريباً ولكن ليس تماماً. يقدم التشويش الطفيف في عشوائية الحركة هذه للجاذبية فرصة لتجميع الغاز في سُحب ضخمة. يمكن أن تستمر عملية التجميع حالما تـبدأ حـتى تتشكل كرة الغاز التي تكون كثافتها الجُسيْمية المركزية كبيرة (راجع الشكل (10 - 5 ج). باسـتمرار شد الجاذبية للذرات باتجاه المركز، يصبح التجاذب المتبادل بين الذرات أكبر وأكبر. إذا استطاع

الغـــاز أن يـــدور بسرعة، ستتسطح السحب ويتحول شكلها إلى شكل كروي مفلطح عند القطبين، وفي الـــنهاية إلى قرص مع انتفاخ في المركز. ستنشأ حلقة مفرغة، وتزداد فجأة وبسرعة كثافة المنطقة المركزية. ســـيرتفع ضغط الغاز في المركز، ويسبب ذلك ارتفاع حرارته. أخيراً، تصبح الحلقة ساخنة جداً بحيث يبدأ الانـــدماج النووي ويولد النجم. يمكن أن تحدث حوادث مشابهة بين ذرات الغاز على مقياس أصغر تؤدي لتشكل الكويكبات، والكواكب، والأقمار الكوكبية.

ضغط الغاز

يمكـــن ضـــغط الغازات وذلك بشكل مختلف عن معظم السوائل. وهذا ما يفسر إمكانية ملء مئات البالونات بخزان واحد صغير من غاز الهيليوم ويفسر إمكانية تنفس الغواص تحت الماء من خزان صغير واحد من الهواء.

تخيل وعاء حجمه V (بالمتر المكعب). افترض وجود N مول من ذرات غاز خاص داخل هذا الوعاء، المحاط بفراغ كامل. نستطيع قول أشياء معينة عن الضغط P، المقدر بالنيوتن بالمتر المربع، الذي يطبقه الغاز علـــى جدران الوعاء. أولاً، يتناسب P مع N، شريطة أن يبقى V ثابتاً. ثانياً، إذا ازداد V مع بقاء N ثابتاً، سيزداد P. هذه الأمور واضحة بشكل بديهي.

يـــوجد عامل هام آخر – الحرارة – يساهم بتمدد وتقلص الغازات تحت الضغط. إن مساهمة الحرارة T، والـــتي تقـــاس عـــادةً بالدرجات الأكبر من درجة الصفر المطلق (التي تُمثّل غياب الحرارة بكاملها)، هامة وحتمـــية. عند ضغط جزء من الغاز، فإنه يسخن؛ عند إزالة الضغط، فإنه سيهدأ. سيزيد تسخين جزء من الغاز ضغطه، إذا بقيت جميع العوامل الأخرى ثابتة، وسينخفض الضغط عند تبريده. إن سلوك المادة معقد قلـــيلاً، وخاصة السوائل والغازات، عند تغيّر شروط درجة الحرارة والضغط، لذا فإن الفصل التالي مكرس لهذا الموضوع.

?? امتحان موجز

عـــد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. افترض أن عيّنة من الغاز تحوي 5.55×10^{18} ذرة بالسنتمتر المكعب. ما هي الكثافة الجُسيْمية؟

(a) 922 mol/m^3

(b) 9.22 mol/m^3

(c) 1.08 mol/m^3

(d) 33.4 mol/m^3

2. افترض أن ثابت النابض لحبل من المطاط 0.150 m/N الذي يتعرض لقوى شد تتراوح بين 0 و10 N. إذا كـــان طول الحبل 1.00 m عند تطبيق قوة 3.00 N، فكم سيكون طول الحبل عند تطبيق قوة شد 5.00 N؟

(a) 1.30 m

(b) 1.67 m

(c) 0.66 m

(d) لا يمكن تحديد الطول من هذه المعلومات.

3. عد إلى الشكل (4-10). افترض أن مساحات المكابس في الشكل (4-10) هي $A_1 = 0.0600\ \mathrm{m}^2$ و $A_2 = 0.0300\ \mathrm{m}^2$. لو ضغطت المكبس رقم 1 باتجاه الأسفل بقوة 5.00 N، ما هي القوة الناتجة على المكبس رقم 2 والمتجهة للأعلى؟

(a) 30.0 N

(b) 10.0 N

(c) 3.00 N

(d) 2.50 N

4. يعتمد مقياس موهس (Mohs) على قدرة الجسم الصلب أو ميله إلى

(a) الغليان عند تسخينه.

(b) الانكسار تحت الضغط.

(c) التمدد أو الضغط.

(d) يَخدِش أو يُخدش.

5. الجسم الصلب ذو الجاذبية الأقل من 1

(a) سيطفو في الماء السائل.

(b) سيمتزج بالماء بشكل منتظم ويبقى ممتزجاً مع الماء السائل.

(c) سيغوص في الماء السائل.

(d) سينحل في الماء السائل.

6. في مادة مرنة بشكل كامل

(a) يتناسب مقدار التمدد عكسياً مع القوة المطبقة.

(b) مقدار التمدد مستقل عن القوة المطبقة.

(c) يتناسب مقدار التمدد طرداً مع القوة المطبقة.

(d) يتناسب مقدار القوة الضروري لكسر الجسم إلى نصفين عكسياً مع طول الجسم.

7. المادة ذات القابلية العالية للطرق

(a) يمكن طرقها وتحويلها إلى طبقة رفيعة رقيقة.

(b) هشة جداً.

(c) تملأ بسهولة أي وعاء تُسكب فيه.

(d) تنتشر بسهولة في السوائل الأخرى.

8. يحدث انتشار الغازات في درجة حرارة الغرفة بسبب

(a) عدم وجود الكثير من الذرات في وحدة الحجم.

(b) تحرك الذرات أو الجزيئات بسرعة.

(c) امتلاك الغازات دائماً جاذبية مُميِّزة عالية.

(d) انحلال الغازات في السوائل الأخرى.

9. افتـــرض أن الكثافة الكُتليّة لمادة ما على الأرض تساوي 8.6×10^3 kg/m^3. لو أخذنا هذه العيِّنة إلى المـــريخ، حـــيث تكون الجاذبية أكبر بنسبة 37 بالمائة مما هي عليه على الأرض، فكم ستكون الكثافة الكُتليّة على المريخ

(a) 3.2 kg/m^3

(b) 8.6 kg/m^3

(c) 23 kg/m^3

(d) يستحيل حسابها اعتماداً على المعلومات المقدمة.

10. يحـــتوي راقود على 100.00 m^3 من السائل، وكتلة السائل 2.788×10^5 kg. ما هي الكثافة الكُتليّة للسائل؟

(a) $2{,}788 \times 10^7$ kg/m^3.

(b) 2,788 g/cm^3.

(c) 2,788 kg/m^3.

(d) الإجابة مستحيلة اعتماداً على البيانات المقدمة.

الفصل 11

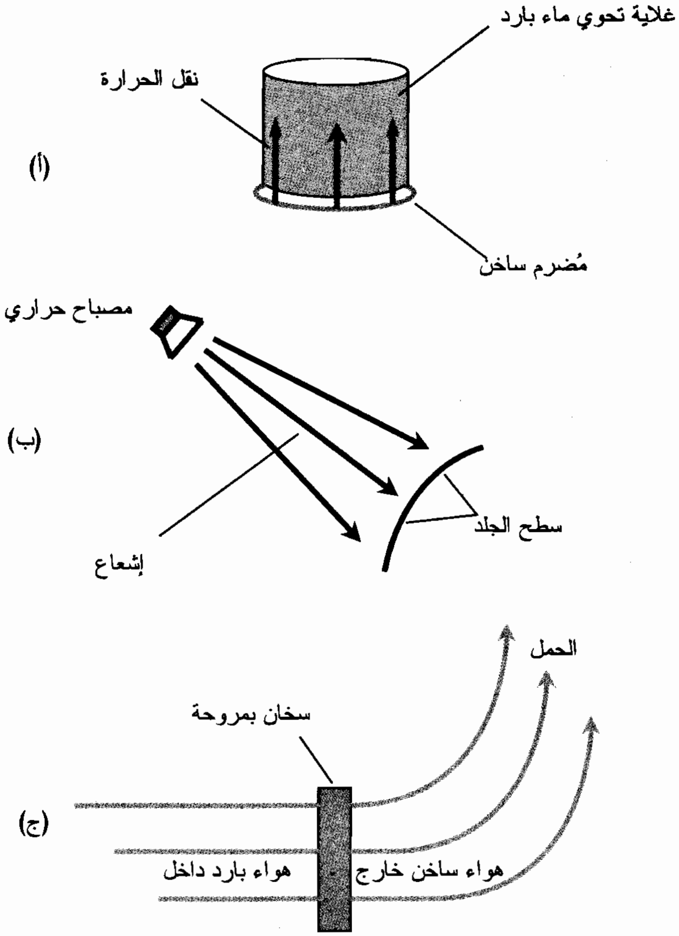
درجة الحرارة والضغط وتغيّرات الحالة

يـزداد ضـغط عيِّنة من الغاز موضوعة في وعاء مغلق عند تسخينها. والعكس صحيح أيضاً: تزداد درجـة حرارة عيِّنة من الغاز عند ضغطها. ولكن، ماذا نعني عندما نتحدث عن *الحرارة* و*درجة الحرارة*؟ ما هـي تأثيرات الحرارة ودرجة الحرارة على المادة؟ هذا ما ستكتشفه في هذا الفصل. سترى أيضاً كيف تتغيّر حالة المادة بتغيّر الضغط ودرجة الحرارة.

ما هي الحرارة؟

الحـرارة هي نوع خاص لانتقال الطاقة التي يمكن أن تنتقل من جسم مادي إلى جسم مادي آخر، أو من مكـان لآخر، أو من منطقة لأخرى. مثلاً، لو وضعت غلاية من الماء على موقد حار، تنتقل الحرارة من المُضرم (الجـزء مـن الموقد الذي يحدث فيه اللهب) إلى الماء. تُدعى هذه *الحرارة المنقولة* أيضاً *بالنقل الحراري* (الشكل (11- 1- أ)). عـندما يشع مصباح الأشعة تحت الحمراء، والذي يُدعى في بعض الأحيان *بالمصباح الحراري*، على كتفك المتألم، تنتقل الحرارة من سلك المصباح إلى سطح جلدك؛ تُدعى هذه *الحرارة المشعة* أيضاً *بالإشعاع الحراري* (انظر إلى الشكل (11- 1- ب)). عندما يقوم سخان كهربائي ذو مروحة بتدفئة الغرفة، يمر الهواء من خـلال عناصر التسخين ويجري نفخه بواسطة المروحة إلى الغرفة، حيث يرتفع الهواء المسخن ويمتزج ببقية الهواء في الغرفة. تُدعى هذه *الحرارة المحمولة* أيضاً *بالحمل الحراري* (انظر الشكل (11- 1- ج)).

الحـرارة لـيست طاقـة، وعلـى الـرغم من ذلك جرى تحديد وحدات الحرارة والطاقة بالأبعاد الفيـزيائية نفـسها. الحـرارة هي انتقال للطاقة عند النقل الحراري، و/أو الإشعاع الحراري، و/أو الحمل الحـراري. يحدث في بعض الأحيان انتقال الطاقة بإحدى هذه الطرق، ولكن تنتقل الطاقة في أحيان أخرى بطريقتين أو ثلاث طرق.



الشكل (11- 1): أمثلة لنقل الطاقة، على شكل حرارة، بواسطة النقل (أ)، والإشعاع (ب)، والحمل (ج).

الحريرة (الكالوري)

إن وحـــدة الحرارة المستخدمة من قبل الفيزيائيين هي *الحريرة*. ربما سمعت وقرأت عن هذا الموضوع عـــدة مـــرات (ربما كثيراً جداً، ولكن ذلك موضوع كتاب آخر). إن الحريرة التي يستخدمها العلماء هي وحدة أصغر بكثير من الحريرة المستخدمة من قبل علماء التغذية – 1/1,000 منها فقط – ويشير الاستخدام العلمي للمصطلح عادةً إلى المُكوِّنات غير الحية، بينما ينخرط الاصطلاح الغذائي في العمليات الحيوية.

إن الحريـــرة (cal) التي نهتم بها كفيزيائيين هي كمية الطاقة المنقولة التي تزيد أو تُنقص درجة حرارة غـــرام واحد (1 g) تماماً من الماء السائل النقي بمقدار درجة سلسيوس واحدة تماماً (1ºC). يكافئ *كيلو حريرة* (kcal) *الحريرة* المستخدمة من قبل الغذائيين، وهي بدورها كمية الطاقة المنقولة التي ستزيد أو تُنقص درجة حـــرارة 1 kg، أو 1,000 g من الماء السائل النقي بمقدار 1ºC. يبقى هذا الأمر صحيحاً فقط إذا بقي الماء

سـائلاً فقط أثناء العملية. ينهار هذا التعريف إذا تجمد أي جزء من الماء، أو ذاب، أو غلى، أو تكاثف. إن هذا التعريف صالح عموماً لدرجات الحرارة التي تتراوح بين 0°C تقريباً (نقطة تجمد الماء) و 100°C (نقطة الغليان) في الضغط القياسي للغلاف الجوي على سطح الأرض.

الحرارة المُميِّزة

يحـتاج الماء السائل الصافي إلى 1حريرة لتسخين أو تبريد (1 cal/g) بمقدار 1°C (بشرط أن لا يكون بدرجة حرارة التجمد/الانصهار أو بدرجة حرارة التبخر/التكاثف، كما سنرى باقتضاب). ولكن، ماذا عن الزيت أو الكحول، أو الماء المالح؟ ماذا عن الأجسام الصلبة كالفولاذ أو الخشب؟ ماذا عن الغازات كالهواء؟ إذاً فالأمر ليس بسيطاً. ستزيد كمية محددة وثابتة من الطاقة الحرارية أو تُنقص درجات الحرارة كميات ثابتة مـن بعض المواد أكثر من بعض المواد الأخرى. تأخذ بعض المواد أكثر من 1 cal/g لتصبح أسخن أو أبرد بمقدار 1°C؛ وبعض المواد تأخذ أقل من ذلك. يأخذ الماء السائل النقي 1 cal/g تماماً ليسخن أو يبرد بمقدار 1°C ببـساطة لأنـه المـادة الـتي اعتمد تعريف الحريرة عليها. إنها أحد هذه الأمور التي يدعوها العلماء *بالمصطلح*.

لنفـرض أنـه لديـنا عيِّنة من سائل مجهول. ولنسمِّها *المادة X*. أخذنا من هذه المادة كمية مقدارها (1.00 g)، بدقـة ثلاثة أرقام، من خلال سكب جزء منها في أنبوب اختبار موضوع على ميزان المختبر. ثم نقلنا طاقة بمقدار 1 حريرة (1.00 cal) إلى المادة X. افترض أنه نتيجة لعملية نقل الطاقة، ازدادت درجة حرارة المـادة X بمقدار 1.20°C؟ من الواضح أن المادة X ليست الماء لأنها تصرفت بشكل مختلف عن الماء عندما تلقـت الطاقة المنقولة. بهدف رفع درجة حرارة 1.00 g من هذه المادة بمقدار 1.00°C، ستأخذ حرارة أقل نوعاً ما من 1.00 cal. لنكون دقيقين، فنحن محكومون بقواعد الأرقام الهامة، ستأخذ المادة = 1.00/1.20 0.833 Cal لرفع درجة حرارتها بمقدار 1.00°C.

افترض الآن أنه لدينا عيِّنة من مادة أخرى، ولتكن جسماً صلباً هذه المرة. دعنا ندعوها *المادة Y*. قمنا بـنحت قطعة منها حتى حصلنا على جزء وزنه 1.0000 g بدقة خمسة أرقام هامة. يمكننا مرة أخرى استخدام ميزان المختبر الموثوق لها الغرض. ننقل طاقة بمقدار 1.0000 Cal إلى المادة Y. افترض أن درجة حرارة هذا الجسم الصلب قد ارتفعت بمقدار 0.80000°C؟ تستقبل هذه المادة الطاقة الحرارية بأسلوب مختلف عن كل من الماء السائل أو المادة X. نحتاج لأكثر بقليل من 1.0000° Cal لرفع درجة حرارة 1.0000 g من هذه المـادة بمقدار 1.0000°C. يمكننا من خلال الحساب ضمن ما هو مسموح لنا من الأرقام الهامة تحديد أنها تأخذ 1.2500 cal = 1.0000/0.80000 لرفع درجة حرارة هذه المادة بمقدار 1.0000°C.

نحـن علـى وشك اكتشاف شيء هام هنا: وهي خاصية مُميِّزة للمادة تُدعى *الحرارة المُميِّزة*، وهي محددة بوحدة حريرة بالغرام بالدرجة سلسيوس (cal/g/°C). دعنا نقول أننا نحتاج إلى c حريرة من الحرارة لرفع درجة حرارة 1 غرام تماماً من المادة بمقدار 1°C تماماً. نعلم مسبقاً أن $c = 1$ cal /g/°C بالنسبة للماء، وذلك بأي عدد من الأرقام الهامة نريده. بالنسبة للمادة X، تكون $c = 0.833$ cal /g/°C (مُقرّبة إلى ثلاثة أرقام هامة)، وبالنسبة للمادة Y، تكون $c = 1.2500$ cal /g/°C (مقربة إلى خمسة أرقام هامة).

يمكـــن بـــدلاً ممـــا سبق التعبير عن c بالكيلو حريرة بالكيلوغرام بالدرجة سلسيوس (kcal/kg/°C) وستكون قيمة c لأي مادة بالكيلو حريرة بالكيلوغرام بالدرجة سلسيوس هي قيمة c نفسها بالحريرة بالغرام بالدرجـــة سلسيوس. بالنسبة للماء، فإن $c = 1$ kcal/kg/°C، مقربة لأي عدد من الأرقام الهامة نريده. بالنسبة للمـــادة X، تكـــون $c = 0.833$ kcal /kg/°C (مقربة إلى ثلاثة أرقام هامة)، وبالنسبة للمادة Y، تكون $c = 1.2500$ kcal /kg/°C (مقربة إلى خمسة أرقام هامة).

الوحدة الحرارية الإنكليزية (BTU)

تُـــستخدم في بعض التطبيقات وحدة للحرارة مختلفة كلياً: وهي *الوحدة الحرارية الإنكليزية* (Btu). ربما سمعت بالوحدة المذكورة من خلال الإعلانات عن الأفران ومكيفات الهواء. إذا تحدث شخص ما عن وحـــدة Btu بـــشكل مـــستقل مع اعتبار سعة التسخين والتبريد للفرن أو مكيف الهواء، فسيكون ذلك اســـتخداماً غير سليم للاصطلاح. إنها تعني حقيقة تقدير معدل الطاقة المنقولة مقدرة بوحدة Btu بالساعة، وليس الكمية الكلية من الطاقة المنقولة بوحدة Btu.

تُعـــرَّف Btu على أنها كمية الحرارة التي ستزيد أو تُنقص درجة حرارة رطل إنكليزي واحد (باوند) تمامـــاً من الماء السائل الصافي بمقدار درجة فهرنهايت واحدة (1°F). هل يبدو أن هذا التعريف ينقصه أي شـــيء؟ إذا كـــنت قلقاً منه فلديك سبب وجيه. ما هو الرطل الإنكليزي (*الباوند*)؟ إنه يعتمد على مكان وجودك. كم يزن 1 lb من الماء؟ إنه يزن على سطح الأرض 0.454 kg أو 454 g تقريباً. ولكن يزن 1.23 kg مـــن المـــاء السائل على المريخ 1 lb. في بيئة انعدام الوزن، كمتن سفينة فضاء تدور حول الأرض أو تتجول في أعمـــاق الفـــضاء، لا يكـــون لتعريف Btu معنى لأنه لا يوجد شيء اسمه الرطل الإنكليزي (الباوند) على الإطلاق.

على الرغم من هذه النواقص، لا تزال وحدة Btu تُستخدم من حين لآخر، لذا يجب أن تكون على معرفة بها. تُحدد الحرارة المُميِّزة عادةً بوحدة Btu بالباوند بالدرجة فهرنهايت (Btu/lb/°F). في الحالة العامة لا تكون قيمة الحرارة المُميِّزة مقدرة بوحدة Btu هي قيمة الحرارة المُميِّزة مقدرة Cal /g/°C.

مسألة (1−11)

افتـــرض أنـــه لديك 3.00 g من مادة معينة. تقوم بنقل طاقة مقدارها 5.0000 cal إليها، وترتفع درجـــة الحـــرارة بانتظام في العيِّنة بكاملها بمقدار 1.1234°C. العيِّنة لا تغلي، و لا تتكاثف، و لا تتجمد، و لا تذوب أثناء العملية. ما هي الحرارة المُميِّزة لهذه المادة؟

حل (1−11)

دعـــنا نكتشف كمية الطاقة التي يتلقاها 1.00 g من المادة الواردة في السؤال. لدينا 3.00 g من المادة، وتحصل على 5.0000 cal، وبالتالي يمكن أن نستنتج أن كل غرام يحصل على $\frac{1}{3}$ من الكمية 5.0000 cal أو يحصل على 1.6667 cal.

نعلم أن درجة الحرارة ارتفعت بانتظام في العيِّنة بكاملها. وهذا يعني أنه لم يجرِ تسخين أماكن منها أكثـر مـن أماكن أخرى؛ أي لا تسخن في مكان ما منها أكثر من الأماكن الأخرى. لذلك فهي تـسخن بالمقدار نفسه في أي مكان منها. لذلك، تزيد درجة حرارة 1.00 g من هذه المادة بمقدار 1.1234°C عند نقل 1.6667 cal من الطاقة إليها. ما هي كمية الحرارة المطلوبة لرفع درجة الحرارة بمقـدار 1.0000°C؟ إنه العدد c الذي نبحث عنه، أي الحرارة المُميِّزة. للحصول على c، يجب أن نُقـسِّم 1.6667 cal/g على 1.1234°C. وبالتالي c = 1.4836 Cal/g/°C. بما أن كتلة العيِّنة قد أُعطيت بثلاثة أرقام هامة، يجب تقريب الجواب بالتدوير إلى 1.48 cal/g/°C.

درجة الحرارة

بعـد أن عرّفنا الحرارة، ماذا نعني بالاصطلاح *درجة الحرارة*؟ لديك فكرة أولية عنها؛ فمثلاً، تكون درجة الحرارة عموماً أعلى في الصيف منها في الشتاء. إن درجة الحرارة هي عبارة عن كمية الطاقة الحركية المحـتواة في المادة. إنه التعريف الأكثر شيوعاً. في الحالة العامة، كلما ارتفعت درجة الحرارة، كلما ازدادت حركة الذرات والجزيئات.

يمكـن التعـبير عـن درجـة الحرارة بطريقة أخرى. مثلاً، لقياس درجات حرارة النجوم البعيدة، والكواكب، والغيمة السديمية في الفضاء الخارجي، ينظر الفلكيون لطريقة إصدار الطاقة الكهرطيسية (EM) علـى شـكل ضـوء مرئي، وتحت الحمراء، وفوق البنفسجية، وحتى أمواج ميكروية وأشعة x. يكتشف الفلكـيون قيمة *الحرارة الطيفية* للجسم أو المادة البعيدة من خلال فحص شدة هذا الإشعاع كتابع لطول الموجة.

عـندما يُـسمح للطاقة بالتدفق من إحدى المواد إلى مادة أخرى على شكل حرارة، تحاول درجات الحـرارة أن تتوازن. أخيراً، إذا سُمح لعملية نقل الطاقة بالاستمرار لمدة كافية من الزمن، ستصبح درجات حـرارة كـل من الجسمين متساوية، إذا لم يجرِ تشتيت إحدى المواد (مثلاً، البخار المتصاعد من غلاية ماء يغلـي). تحاول الطاقة الحركية لكل الأجسام في الكون بكامله بأن تكون في حالة التوازن. لن تنجح مواد الكون في حياتك أو حياتي أو حتى أثناء حياة الشمس أو النظام الشمسي، ولكنها ستستمر في المحاولة على أي حال، وهي تنجح بشكل تدريجي. تُدعى هذه العملية *بالإنتروبية الحرارية*.

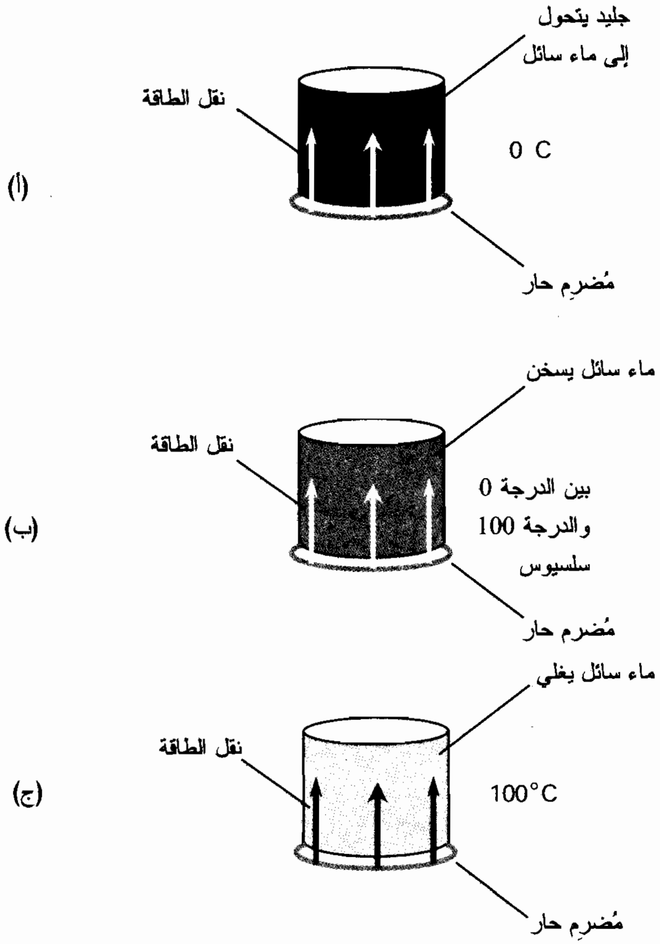
مقياس سلسيوس (أو مقياس الحرارة المئوي)

تحدثنا حتى الآن بحرية نوعاً ما عن درجة الحرارة، وعبرنا عنها غالباً بدلالة مقياس سلسيوس أو مقياس الحرارة المئوي (°C). يعتمد ذلك على سلوك الماء على سطح الأرض في مستوى سطح البحر وتحت ضغط الغلاف الجوي الطبيعي.

إذا كانـت لديك عيِّنة باردة جداً من الجليد وبدأت بتسخينها، ستبدأ في النهاية بالانصهار في حال استمرار تلقيها الحرارة من البيئة. تكون درجة حرارة الجليد والماء السائل الناتج عن انصهاره 0°C اصطلاحاً

(الــشكل (11-2-أ)). مع استمرار ضخ الطاقة إلى قطعة الجليد، سينصهر قسم أكبر وأكبر منها، وستبقى درجة حرارتها 0ºC. لن تكتسب العيِّنة أي حرارة إذا لم تتحول بالكامل إلى سائل ولن تتبع كذلك قواعد الماء السائل الصافي.

حالما يصبح الماء بكامله سائلاً ومع استمرار ضخ الطاقة إليه، ستبدأ درجة حرارته بالارتفاع (انظر إلى الــشكل (11- 2- ب)). سيبقى الماء سائلاً برهة وسيسخن أكثر وأكثر مُتبعاً القاعدة 1cal/g/ºC. ولكن سيــصل أخيراً لنقطة يبدأ الماء فيها بالغليان، ويتحول قسم منه إلى الحالة الغازية. تصبح درجة حرارة الماء السائل وبخار الماء الناتج عنه مباشرة بقيمة 100ºC اصطلاحاً (انظر إلى الشكل (11- 2- ج).



الشكل (11-2): انصهار الجليد وتحوله إلى ماء سائل (أ)، تسخين الماء السائل دون أن يغلي (ب)، والماء يبدأ بالغليان (ج).

توجد الآن نقطتان نهائيتان - *نقطة تجمد الماء ونقطة غليانه* - تُمثّلان قيمتين لدرجة الحرارة المُميِّزة. نستطيع تحديد مخطط للتعبير عن درجة الحرارة بالاعتماد على هاتين النقطتين: إنه *مقياس سلسيوس للحرارة*، الذي سُمي باسم العالم الذي ابتكر الفكرة لأول مرة. يُدعى في بعض الأحيان بمقياس الحرارة المئوي لأن درجة الحرارة الواحدة على هذا المقياس تساوي 1/100 من الفرق بين درجة حرارة انصهار الماء في مستوى سطح البحر ودرجة حرارة غليان الماء الصافي في مستوى سطح البحر. تعني البادئة سنتي (centi) "1/100"، وبالتالي (centigrade) تعني سنتيغراد حرفياً "تدريجات بقيمة 1/100".

مقياس كيلفن

يمكن بالطبع تجميد الماء والاستمرار بتبريده أو غليه وتحويله إلى بخار ثم الاستمرار بتسخينه. يمكن أن تصل درجات الحرارة إلى درجات أخفض بكثير من 0°C ويمكن أن تتجاوز بكثير درجة 100°C. هل توجد نهايات لمدى الانخفاض في درجة الحرارة أو مدى الارتفاع؟

من الطريف وجود نهاية لانخفاض درجات الحرارة على مقياس سلسيوس، ولكن لا يوجد نهاية عليا على هذا المقياس. يجب بذل جهود غير عادية لتبريد قطعة الجليد وخفض حرارتها لنرى مدى برودتها، ولكن لا نستطيع تبريدها لدرجة أخفض تقريباً 273 سلسيوس تحت الصفر (-273°C). تُدعى هذه الدرجة *بدرجة الصفر المطلق*. لا يستطيع الجسم بدرجة الصفر المطلق نقل أي طاقة إلى أي شيء آخر لأنه لا يملك أي طاقة لنقلها. يُعتقد أنه لا يوجد جسم كهذا في كوكبنا، وعلى الرغم من ذلك تقترب بعض الذرات من هذه الدرجة في الفضاء الواسع بين المجرات.

تشكل درجة الصفر المطلق أساس مقياس كيلفن للحرارة (K). درجة الحرارة -273.15°C تساوي 0K. إن حجم درجة كيلفن هو نفسه حجم درجة سلسيوس، وبالتالي 0°C = 273.15 K، و+100°C = 373.15 K لاحظ أنه لم يجرِ استخدام رمز الدرجة مع K.

يمكن في النهاية العليا الاستمرار في تسخين المادة بشكل غير محدود. ترتفع درجات الحرارة في مراكز النجوم إلى ملايين الدرجات على مقياس كيلفن. إن الفرق بين درجة الحرارة على مقياس كيلفن ودرجة الحرارة على مقياس سلسيوس يساوي دائماً 273.15 درجة، لا توجد أي مشكلة بشأن درجة الحرارة الفعلية.

يمكن في بعض الأحيان اعتبار أرقام سلسيوس وكيلفن متساوية. عندما نسمع أحداً يقول إن درجة الحرارة في مركز نجم معين 30 مليون K، فهذا يعني 30 مليون °C لأن ± 273.15 مهملة بالنسبة إلى القيمة 30 مليوناً.

مقياس رانكين

إن مقياس كيلفن ليس المقياس الوحيد الموجود لتحديد درجة الحرارة المطلقة، وعلى الرغم من ذلك فإنه المقياس الأكثر استخداماً. يُسنِد مقياس آخر يُدعى *مقياس رانكين* (°R) قيمة الصفر إلى درجة الحرارة

الأكثر برودة ممكنة. إن الفرق بينهما هو أن درجة رانكين تساوي تماماً $^5/_9$ درجة كيلفن. بشكل معاكس، فإن درجة كيلفن تساوي تماماً $^9/_5$ درجة رانكين.

إن درجة حرارة مقدارها 50K تساوي 90ºR؛ ودرجة حرارة مقدارها 360ºR تساوي 200k. لتحويل أي قراءة على مقياس رانكين ºR إلى مكافئها على مقياس كيلفن K، اضرب بالعدد $^5/_9$. بشكل معاكس، لتحويل أي قراءة على مقياس كيلفن K إلى مكافئها على مقياس رانكين، اضرب بالعدد $^9/_5$، أو 1.8 تماماً.

إن الفرق بين مقياسي رانكين وكيلفن هام في القراءات الكبيرة جداً. إذا سمعت أحداً ما يقول إن درجة الحرارة في مركز نجم تساوي 30 مليون ºR، فهو يتحدث عن مكافئها التقريبي المساوي 16.7 مليون K. ولكن من غير المحتمل أن تسمع أحداً ما يستخدم أعداد رانكلين.

مقياس فهرنهايت

يُستخدم مقياس فهرنهايت للحرارة (ºF) من قبل العموم في معظم العالم الناطق بالإنكليزية وخاصة في الولايات المتحدة. إن درجة فهرنهايت بحجم درجة رانكين نفسه. ولكن، المقياس في وضع مختلف. إن درجة انصهار جليد الماء الصافي في مستوى سطح البحر هي 32ºF+، ونقطة غليان الماء السائل الصافي هي 212ºF+. وبالتالي توافق الدرجة 32ºF+ الدرجة 0ºC، وتوافق الدرجة 212ºF+ الدرجة 100ºC+. تساوي درجة الصفر المطلق 459.67ºF- تقريباً.

إن عمليات تحويل درجات الحرارة الأكثر شيوعاً هي عمليات التحويل من الفهرنهايت إلى سلسيوس، أو العكس. جرى تطوير صيغ لهذا الهدف. لتكن F درجة الحرارة مقدرة بالفهرنهايت ºF، ولتكن C درجة الحرارة مقدرة بالسلسيوس ºC. إذا احتجت للتحويل من ºF إلى ºC، استخدم هذه الصيغة

$$F = 1.8C + 32$$

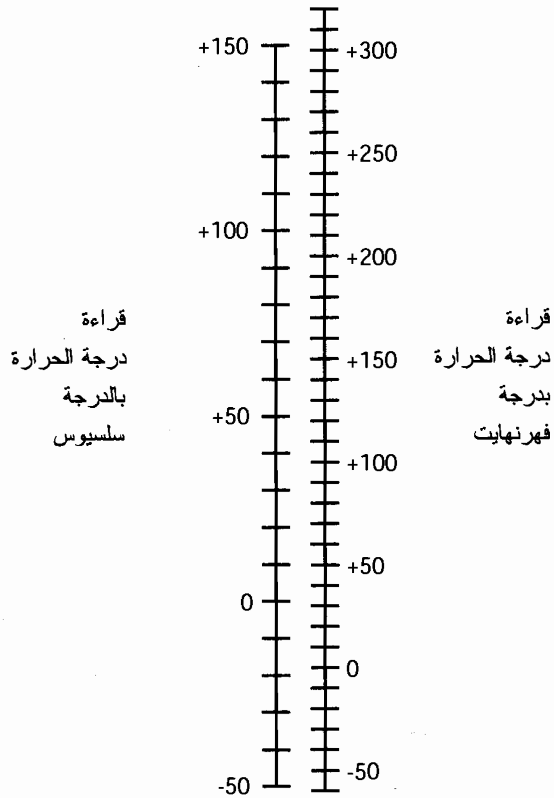
إذا احتجت لتحويل القراءة من ºC إلى ºF، استخدم هذه الصيغة:

$$C = {}^5/_9\,(F - 32)$$

على الرغم من أنه قد جرى التعبير عن هذه المعادلات برقم أو رقمين هامين فقط (1.8، و$^5/_9$، و32)، إلا أنه يمكن اعتبارها صحيحة رياضياً وذلك لأغراض حسابية.

يمكن استخدام الدراسة الموضحة في الشكل (11–3) لعمليات تحويل درجات الحرارة التي تتراوح بين 50ºC– و 150ºC+ بشكل تقريبي.

عندما تسمع شخصاً ما يتحدث عن درجة الحرارة في مركز نجم على أنها تساوي 30 مليون ºF، تكون القراءة على مقياس رانكين نفسها تقريباً، ولكن تكون القراءات على مقاييس سلسيوس وكيلفن حوالى $^5/_9$ فقط من القراءة على مقياس فهرنهايت.



الشكل (11-3): يمكن استخدام هذه الدراسة لإجراء عمليات التحويل التقريبية بين درجات الحرارة مقدرة بالفهرنهايت °F ودرجات الحرارة مقدرة بالسلسيوس °C.

مسألة (11-2)

ما هي درجة الحرارة مقدرة بالدرجة سلسيوس لدرجة الحرارة 72°F؟

حل (11-2)

لحل هذه المسألة، استخدم ببساطة الصيغة السابقة لتحويل درجات الحرارة المقدرة بالفهرنهايت إلى درجات حرارة مقدرة بالسلسيوس:

$$C = {}^{5}/_{9}\,(F - 32)$$

لذلك فإنه في هذه الحالة

$$C = {}^{5}/_{9}\,(72 - 32)$$
$$= {}^{5}/_{9} \times 40 = 22.22°C$$

لقد أجرينا هذه العملية الحسابية برقمين هامين فقط لأن بيانات الدخل معطاة برقمين هامين. لذلك نستطيع أن نستنتج أن درجة الحرارة المكافئة مقدرة بالسلسيوس هي 22°C.

مسألة (11-3)

ما هي درجة الحرارة مقدرة بالكلفين لدرجة الحرارة 80.0ºF؟

حل (11-3)

توجد طريقتان لحل هذه المسألة. الأولى بتحويل القراءة بالفهرنهايت إلى رانكين ثم تحويل هذا الرقم إلى كـــيلفن. الثانية هي بتحويل القراءة بالفهرنهايت إلى سلسيوس ثم تحويل هذا الرقم إلى كيلفن. دعنا نستخدم الطريقة الثانية لأنه من الصعب استخدام مقياس رانكين لأي عملية قياس.

باستخدام الصيغة السابقة للتحويل من ºF إلى ºC، فإننا نحصل

$$C = {}^5/_9\,(80.0 - 32)$$
$$= {}^5/_9 \times 48.0 = 26.67^{\circ}C$$

دعنا لا نقرِّب رقمنا هذا الآن لأنه علينا إنجاز عملية حساب أخرى. تذكر أن الفرق بين القراءات بالسلسيوس ºC والكلفين K يساوي دائماً 273.15. الرقم بالكلفين أكبر من الرقمين السابقين. وبالـــتالي يجـــب إضافة 273.15 لقراءتنا على مقياس سلسيوس. إذا كانت K تُمثّل درجة الحرارة بالكلفين، إذاً

$$K = C + 273.15$$
$$= 26.67 + 273.15$$
$$= +299.82\ K$$

الآن يجـــب أن نُقرِّب رقمنا بالتدوير. بما أن بيانات الدخل مقدمة بثلاثة أرقام هامة، يمكن أن نقول أن درجة الحرارة المكافئة مقدرة بالكلفين هي +300 K.

بعض تأثيرات درجة الحرارة

يمكن لدرجة الحرارة أن تؤثر على الحجم أو الضغط المُطبَّق على عيِّنة من المادة. تعلم حقيقة أن معظم المعادن تتمدد عند تسخينها؛ وحقيقة أن بعض المعادن تتمدد أكثر من معادن الأخرى.

درجة الحرارة، والحجم، والضغط

ســتبذل عيِّـــنة من الغاز الموضوع في وعاء صلب مزيداً ومزيداً من الضغط على جدران الوعاء عند ارتفاع درجة الحرارة. إذا كان الوعاء مرناً، كالبالون، سيزداد حجم الغاز. بشكل مشابه، إذا أخذت وعاء فـــيه كمية من الغاز وجعلت الوعاء فجأة أكبر دون إضافة المزيد من الغاز، سيُنتج انخفاض الضغط انخفاضاً في درجـــة الحـــرارة. إذا كـــان لديك وعاء صلب يحوي غازاً ثم سُمح لبعض الغاز بالخروج (أو تم ضخه خارجـــاً)، فـــإن انخفـــاض الـــضغط سيُبرِّد الوعاء. ولذلك تبرد علبة الهواء المضغوط الصغيرة مثلاً عندما تستخدمها لإبعاد الغبار عن لوحة مفاتيح كمبيوترك.

تتـــصرف السوائل بشكل أكثر غرابة قليلاً. لا يتغيّر حجم الماء السائل في الغلاية، ولا يتغيّر الضغط الذي تُطبِّقه على جدران الغلاية بارتفاع درجة الحرارة وانخفاضها إذا لم يتجمد الماء أو يغلي. ولكن تتمدد بعـــض السوائل، المختلفة عن الماء، عند تسخينها. الزئبق هو مثال لذلك. وهكذا يعمل مقياس الحرارة ذو النمط القديم.

تـــتمدد الأجسام الصلبة في الحالة العامة عندما ترتفع درجة الحرارة، وتتقلص عندما تنخفض درجة الحـــرارة. إنـــك لا تلاحظ هذا التمدد والتقلص في كثير من الحالات. هل يبدو مقعدك أكبر عندما تكون درجة حرارة الغرفة $30\ ^{\circ}C$ منه عندما تكون درجة حرارة الغرفة $20^{\circ}C$؟ بالطبع لا. ولكنه كذلك! أنت لا ترى الفرق لأنه بالغ الصغر. ولكن، تنثني القطعة ثنائية المعدن في الترموستات، التي تتحكم بالفرن أو مكيف الهـــواء، وذلك عندما يتمدد أحد معادنها أو يتقلص بشكل طفيف أكثر من المعدن الآخر. لو وضعت قطعة كهذه بالقرب من لهب حار، يمكنك فعلياً مراقبة التفافها أو استقامتها.

درجة الحرارة القياسية والضغط القياسي (STP)

عـــرّف العلماء *درجة الحرارة القياسية والضغط القياسي* (STP)، وذلك لوضع درجة حرارة وضغط مرجعيين للقياسات التي يجري أخذها والتجارب التي يمكن تنفيذها. تكون الحالة نموذجية إذا جرى القياس على مستوى سطح البحر وكان الهواء جافاً.

إن درجـــة الحرارة القياسية هي $0^{\circ}C$ ($32^{\circ}F$)، وهي نقطة تجمد أو نقطة انصهار الماء السائل الصافي. الضغط القياسي هو ضغط الهواء الذي يكافئ ضغط عامود من الزئبق ارتفاعه 0.760 m (أقل بقليل من 30 in). يكافئ ذلك ضغطاً مقداره 14.7 رطل إنكليزي (باوند) بالإنش المربع (lb/in^2)، والذي يُترجم إلى 1.01×10^5 نيوتن بالمتر المربع (N/m^2).

الهواء ثقيل بصورة تثير الدهشة. نحن لا نفكر بأن للهواء كتلة هامة، وذلك لأننا مغموسون فيه. عند الغـــوص لمترين فقط في حوض سباحة، لن تشعر بالكثير من الضغط ولن يبدو الماء ثقيلاً، ولكن لو حسبت كتلة الكمية الهائلة من الماء الواقعة فوقك، قد تفزع من الماء! إن كثافة الهواء الجاف في STP تساوي تقريباً $1.29\ kg/m^3$. تزن قطعة من الهواء طولها 4.00 m وعرضها 4.00 m، وارتفاعها 4.00 m، أي حجم غرفة نـــوم كـــبيرة، 82.6kg. يُترجم ذلك عملياً في حقل الجاذبية الأرضي إلى 182 رطلاً إنكليزياً (باوند)، أي وزن رجل بالغ ذي حجم جيد.

التمدد والتقلص الحراري

افتـــرض أنه لديك عيِّنة من مادة صلبة تتمدد عندما ترتفع درجة الحرارة. إنها الحالة الطبيعية، ولكن تتمدد بعض الأجسام الصلبة أكثر من أجسام صلبة أخرى بالنسبة لكل درجة سلسيوس. يدعى المجال الذي يتغيّـــر فيه ارتفاع، أو عرض، أو عمق جسم صلب (بعده الخطي) لكل درجة سلسيوس *بالمعامل الحراري للتغيّر الخطي*.

يكون المُعامل الحراري ثابتاً في معظم المواد ضمن مجال معقول من درجات الحرارة. هذا يعني أنه إذا تغيرت درجة الحرارة بمقدار 2ºC، سيتغير البعد الخطي ضعفي تغيره فيما إذا تغيرت درجة الحرارة بمقدار 1ºC. ولكن، يوجد بالطبع حدود لذلك. إذا سخنت معدناً لدرجة حرارة عالية كفاية، سيصبح أطرى وسينصهر في النهاية أو حتى يحترق أو يتبخر. سيتجمد الزئبق إذا قمت بتبريده في ميزان الحرارة لدرجة كافية. وبالتالي لن تتمكن من تطبيق القاعدة البسيطة التي تُعطي مقدار الزيادة في الطول بدلالة درجة الحرارة.

في الحالة العامة، إذا كان s يُمثّل الفرق في البعد الخطي (بالمتر) الناتج عن تغيّر درجة الحرارة بمقدار T (بالدرجة سلسيوس) لجسم بعده الخطي (بالمتر) هو d، إذاً يعطي المُعامل الحراري للتمدد الخطي والذي يرمز له بالحرف اللاتيني الصغير ألفا (α)، بهذه المعادلة

$$\alpha = s/(dT)$$

يُعتبر s موجباً عندما يزداد البعد الخطي، ويُعتبر سالباً عندما ينقص البعد الخطي. ينجم عن رفع درجات الحرارة قيم موجبة للتغيّر في درجة الحرارة T؛ وينجم عن خفض درجات الحرارة قيم سالبة للتغيّر في درجة الحرارة T.

يجري تحديد مُعامل التمدد الخطي بالمتر بالمتر بالدرجة سيلسيوس. نختصر الأمتار في عبارة الوحدات وبالتالي تصبح الكمية مقدرة بالدرجة سلسيوس، ويرمز لها ºC/.

مسألة (4-11)

تصور قضيباً معدنياً طوله 10.000 m في درجة الحرارة 20.00ºC. افترض أن ذلك القضيب يتمدد ليصبح طوله 10.025 m في درجة الحرارة 25.00ºC. ما هو المُعامل الحراري للتمدد الخطي؟

حل (4-11)

يزداد طول هذا القضيب بمقدار 0.025 m عند زيادة درجة الحرارة بمقدار 5.00ºC. لذلك يكون s = 0.025، و d = 10، و T = 5.00. بتعويض هذه الأعداد في الصيغة السابقة، نحصل

$$\alpha = 0.025/(10 \times 5.00)$$
$$= 0.00050/^\circ C = 5.0 \times 10^{-4}/^\circ C$$

يُبرر لنا استخدام رقمين هامين فقط هنا لأنها بدقة بيانات قيم s.

مسألة (5-11)

افترض أن $\alpha = 2.50 \times 10^{-4}/^\circ C$ لمادة معيّنة. تخيل مكعباً من هذه المادة حجمه V_1 يساوي $8.000\ m^3$ في درجة الحرارة 30.0ºC. كم سيكون حجم المكعب V_2 إذا انخفضت درجة الحرارة إلى الدرجة 20.0ºC؟

حل (5-11)

من المهم ملاحظة كلمة خطي في تعريف α. ذلك يعني أن طول كل حرف من حروف المكعب من

هذه المادة سيتغير وفقاً للمُعامل الحراري للتمدد الخطي.

يمكننا إعادة ترتيب الصيغة العامة السابقة للمُعامل α بحيث نجد التغيّر في البعد الخطي كما يلي:

$$s = \alpha\, dT$$

حيث يُمثّل T تغيّر درجة الحرارة (بالدرجة سلسيوس) ويُمثّل d البعد الخطي الأولي (بالمتر). بما أن الجسم مكعب، فالطول الأولي d لكل حرف هو 2.000 m (الجذر التكعيبي للعدد 8.000، أو $8.000^{1/3}$). بما أن الحرارة تنخفض، لذلك تكون $T = -10.0$، وبالتالي

$$s = 2.50 \times 10^{-4} \times (-10.0) \times 2.000$$
$$= -2.50 \times 10^{-3} \times 2.000$$
$$= -5.00 \times 10^{-3}\ \text{m} = -0.00500\ \text{m}$$

وهذا يعني أن طول كل حرف من حروف المكعب في الدرجة 20ºC سيكون = 2.000 - 0.00500 1.995 m. لذلك فحجم المكعب في الدرجة 20.0ºC سيكون $1.995^3 = 7.940149875\ \text{m}^3$. وبما أن بيانات الدخل مقدمة بثلاثة أرقام هامة، يجب تقريب هذا الرقم بالتدوير إلى $7.94\ \text{m}^3$.

درجة الحرارة وحالات المادة

عند تسخين المدة أو تبريدها، فإنها تقوم ببساطة بأشياء أخرى غير التمدد أو التقلص، أو تطبيق ضغط متزايد أو متناقص. إنها تخضع في بعض الأحيان *لتغيّر في الحالة*. يحدث ذلك مثلاً عندما يذوب الجليد الصلب ويتحول إلى ماء سائل أو عندما يغلي الماء ويتحول إلى بخار.

الذوبان والتجمد

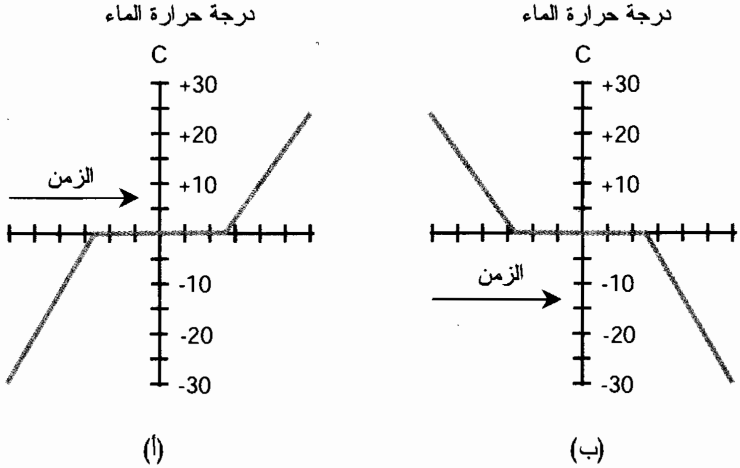
لنأخذ بالاعتبار صديقنا القديم، الماء. تخيل أننا في آخر فصل الشتاء في مكان مثل ويسكونسين الشمالية، وأن درجة حرارة جليد الماء في البحيرة تساوي 0ºC تماماً. الجليد ليس آمنا للتزلج، كما كان في منتصف الشتاء، لأن الجليد، أصبح "طريا". إنه يشبه الثلج المائع أكثر مما يشبه الجليد. إنه صلب جزئياً وسائل جزئياً. ومع ذلك فدرجة حرارة هذا الجليد الطري 0ºC.

يصبح هذا الثلج المائع أطرى مع استمرار ارتفاع درجة الحرارة. تصبح نسبة الماء السائل أكثر والجليد الصلب أقل. ولكن، تبقى درجة حرارته 0ºC. يذوب كل الجليد في النهاية ويتحول إلى سائل. يمكن أن يحدث ذلك بسرعة مدهشة. قد تذهب إلى المدرسة في الصباح وترى البحيرة "مليئة" تقريباً بالثلج المائع وعندما تعود في المساء تراها قد ذابت كليا تقريباً. يمكنك الآن أن تُخرج القارب! ولكنك لن ترغب بالسباحة. سيبقى الماء السائل بدرجة حرارة 0ºC حتى يذوب كل الجليد. عندها فقط ستبدأ درجة الحرارة بالارتفاع ببطء.

خذ بالاعتبار الآن ما يحدث في نهاية الخريف. يصبح الطقس والماء أبرد. تنخفض درجة حرارة الماء في النهاية إلى 0ºC. ويبدأ سطح البحيرة بالتجمد. إن درجة حرارة هذا الجليد الجديد هي 0ºC. يتجمد ماء

البحيرة حتى يصبح سطح البحيرة بالكامل جليداً صلباً. تزداد برودة الطقس (إذا كنت تعيش في ويسكونسين الشمالية فالطقس بارد جداً شتاء). حالما يصبح السطح بالكامل جليداً صلباً، تبدأ درجة الحرارة بالانخفاض إلى ما دون 0°C، ومع ذلك تبقى 0°C على السطح الفاصل بين الجليد الصلب والماء السائل. تزداد سماكة طبقة الجليد. ويمكن أن تصبح درجة حرارة الجليد بالقرب من السطح أقل من 0°C. حيث تعتمد درجة البرودة على عوامل مختلفة، مثل قساوة الشتاء وكمية الثلج المتساقط على الجليد والذي يعزله عن برد الهواء القارس.

لا تتبع درجة حرارة الماء تماماً درجة حرارة الهواء عندما يحدث التسخين أو التبريد في جوار الدرجة 0°C. بدلاً من ذلك تتبع درجة حرارة الماء منحنى يشبه المنحنى الموضح في الشكل (11-4). تصبح درجة حرارة الهواء أعلى في القسم أ؛ وتصبح حرارة الهواء منخفضة أكثر في القسم ب. تتوقف درجة حرارة الماء عند الذوبان أو التجمد.



الشكل (11-4): الماء عندما يذوب ويتجمد. (أ) ارتفاع درجة حرارة البيئة. (ب) انخفاض درجة حرارة البيئة وتجمد الماء.

حرارة الانصهار

تستهلك عيّنة من المادة الصلبة كمية محددة من الطاقة لتتحول إلى الحالة السائلة، على افتراض أنه يمكن أن تتواجد هذه المادة في أي من هاتين الحالتين. (يتبع كل من الماء، والزجاج، ومعظم الصخور، ومعظم المعادن هذا المنحنى، ولكن لا يتبع الخشب هذا المنحنى). في حالة الجليد الذي يتكون من ماء صاف، يُستهلك 80 cal لتحويل 1 g من الجليد بدرجة حرارة 0°C إلى 1 g من الماء السائل الصافي بدرجة حرارة 0°C. تتغيّر كمية الحرارة هذه بتغيّر المواد وتُدعى *بحرارة انصهار المادة*.

في السيناريو المعاكس، إذا تجمد 1 g من الماء السائل الصافي بدرجة حرارة 0°C كلياً وتحول إلى جسم صلب وأصبح جليداً بدرجة حرارة 0°C، فإنه يقدم في هذه العملية 80 cal من الحرارة. لذلك جرى التعبير

عـــن حــــرارة الانـــصهار بالحريرة بالغرام (cal/g). يمكن التعبير عن حرارة الانصهار أيضاً بالكيلو حريرة بالكيلوغـــرام (kcal/kg) وتكون الأعداد المعبرة عن حرارة الانصهار مقدرة (kcal/kg) مساوية للأعداد المعـــبرة عـــن حرارة الانصهار (cal/g) لجميع المواد. عندما تكون المادة المعنية مادة أخرى غير الماء، يجب استبدال درجة 0°C في المناقشة بنقطة تجمد/انصهار تلك المادة.

يجـــري التعـــبير عن حرارة الانصهار في بعض الأحيان بالحريرة بالمول، (cal/mol) بدلاً من حريرة بالغـــرام. ولكن، إذا لم يجرِ الإعلان عن استخدام وحدات الحريرة بالمول، يجب أن تفترض أنه جرى التعبير عنها بالحريرة بالغرام.

إذا رمزنا لحرارة الانصهار (بالحريرة بالغرام) h_f ورمزنا للحرارة المضافة أو المأخوذة من عيِّنة من المادة (بالحريرة) بالرمز h، ورمزنا لكتلة العيِّنة (بالغرام) بالرمز m، إذاً تنص الصيغة التالية على:

$$h_f = h/m$$

مسألة (6-11)

افترض أن مادة معيِّنة تنصهر وتتجمد في الدرجة +400°C. تخيل كتلة صلبة من هذه المادة كتلتها 1.535 kg في الدرجة +400°C. افترض أن هذه الكتلة قد تعرضت للتسخين وانصهرت. افترض أننا استهلكنا 142,761 cal من الطاقة لصهر هذه المادة وتحويلها كلياً إلى سائل في الدرجة +400°C. ما هي حرارة انصهار هذه المادة؟

حل (6-11)

أولاً، يجـــب أن نتأكد من توافق الوحدات. أُعطينا الكتلة بالكيلوغرام؛ لتحويلها إلى غرام، اضربها بالعدد 1.000. بالنتيجة m = 1,535 g. أُعطينا h = 142,761 cal. لذلك، يمكننا استخدام الصيغة السابقة مباشرة:

$$h_f = 142{,}761/\ 1535 = 93.00\ \text{cal/g}$$

وقد قربنا الجواب بالتدوير إلى أربعة أرقام هامة لأن بيانات الدخل بهذه الدرجة من الدقة.

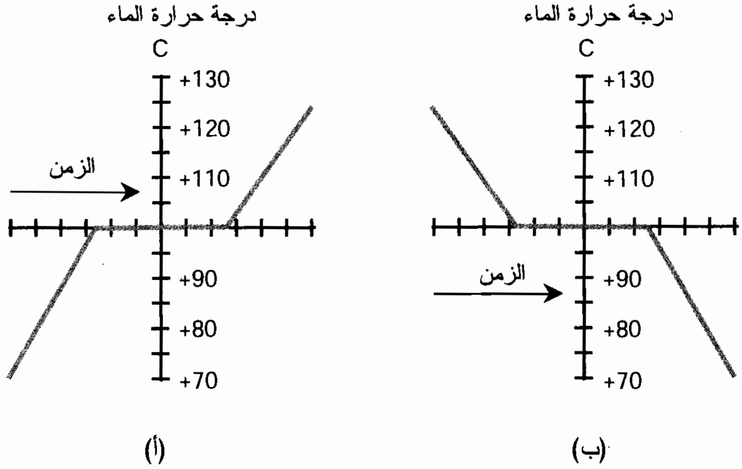
الغليان والتكاثف

دعنا نعود إلى الموقد حيث يجري تسخين غلاية من الماء. إن درجة حرارة الماء +100°C تماماً، ولكن لم يـــبدأ الماء بالغليان بعد. يبدأ الماء بالغليان مع استمرار تزويده بالحرارة. تصبح نسبة بخار الماء أكبر ونسبة المـــاء السائل أقل. ولكن، تبقى درجة الحرارة +100°C. أخيراً غلى كل الماء وبقي البخار فقط. تخيل أننا التقطـــنا كل هذا البخار، أثناء عملية الغليان، حيث تم إخراج كل الهواء من الوعاء واستبدلناه ببخار الماء. يستمر مُضرم الموقد، وهو من نوع كهربائي، بتسخين الماء حتى بعد تبخر كل الماء.

في لحظـــة اختفاء آخر كمية من السائل، تكون درجة حرارة البخار +100°C. يعتمد المدى الأعظم لإمكانية تسخين البخار على قوة المُضرم وعلى جودة عازلية الوعاء.

خـــذ بالاعتـــبار الآن ما يحدث له إذا أبعدنا الوعاء، مع الغلاية عن الموقد ووضعناهما في براد. يصبح الجو المحيط وبخار الماء أبرد. تنخفض درجة حرارة البخار في النهاية إلى 100°C+. يبدأ البخار بالتكاثف. إن درجة حرارة هذا الماء السائل 100°C+. يستمر التكاثف حتى يتكاثف كل البخار. (ولكن من الصعب أن يـــتكاثف أي جزء منه في الغلاية. ما المشكلة!) نسمح لقليل من الهواء داخل الحجرة بالقرب من نهاية هذه التجربة بالحفاظ على ضغط معقول في الداخل. تزداد برودة الحجرة؛ حالما يتكاثف كل البخار، تبدأ درجة حرارة السائل بالانخفاض إلى ما دون 100°C+.

كمـــا هي حالة الانصهار والتجمد، لا تتبع درجة حرارة الماء درجة حرارة الهواء بشكل كامل عند حـــدوث التـــسخين أو التبريد في درجة حرارة قريبة من 100°C+. بدلاً من ذلك، تتبع درجة حرارة الماء مـــنحنى يشبه المنحنى الموضح في الشكل (11-5). في القسم أ، تزداد درجة حرارة الهواء؛ في القسم (ب) تـــنخفض درجة حرارة الهواء. "تثبت"درجة حرارة الماء عندما يغلي أو يتكاثف. تُبدي بعض المواد الأخرى الخاصيّة نفسها عندما تغلي أو تتكاثف.



الشكل (11-5): الماء عندما يغلي ويتكاثف. **(أ)** تزداد درجة حرارة البيئة المحيطة، والماء السائل يغلي. **(ب)** تنخفض درجة حرارة البيئة المحيطة وبخار الماء يتكاثف.

حرارة التبخر

تستهلك عيِّنة من المادة السائلة كمية محددة من الطاقة لتتحول إلى الحالة الغازية، وذلك على افتراض إمكانـــية تواجد هذه المادة في أي من هاتين الحالتين. يُستهلك 540 cal في حالة الماء، لتحويل 1 g من الماء الـــسائل بدرجة حرارة 100°C+ إلى 1 g من بخار الماء الصافي بدرجة حرارة 100°C+. تتغيّر هذه الكمية بتغيّر المواد وتُدعى *حرارة تبخر المادة*.

في السيناريو المعاكس، إذا تكاثف 1 g من بخار الماء الصافي بدرجة حرارة 100°C+ بشكل كلي وأصبح

ماء سائلاً بدرجة حرارة +100°C، فإنه يقدم في هذه العملية 540 cal من الحرارة. جرى التعبير عن حرارة التبخـــر بـــوحدات حرارة الانصهار نفسها، أي بالحريرة بالغرام (cal/g). يمكن التعبير عنها أيضاً بالكيلو حريـــرة بالكيلوغرام (kcal/kg) وستنتج الأعداد نفسها تماماً التي نتجت بأرقام cal/g وذلك لجميع المواد. عـــندما تكون المادة المعنية مادة أخرى غير الماء، يجب استبدال درجة +100°C بنقطة غليان/تكاثف تلك المادة.

يجـــري في بعض الأحيان، التعبير عن حرارة التبخر، كما في حالة حرارة الانصهار، بالحريرة بالمول (cal/mol) بدلاً من cal/g. ولكن لا يُمثّل ذلك الحالة السائدة.

إذا رمـــزنا لحـــرارة التبخـــر (بالحريرة بالغرم) بالرمز h_v، وإذا رمزنا للحرارة المضافة أو المقدمة من عيّـــنة مـــن المادة (بالحريرة) بالرمز h، ورمزنا إلى كتلة العيّنة (بالغرام) بالرمز m، فإن الصيغة التالية تنص على:

$$h_v = h/m$$

إنها صيغة حرارة الانصهار نفسها، باستثناء أننا عوضنا h_f بالقيمة h_v.

مسألة (11-7)

افترض أن مادة معيّنة تغلي وتتكاثف بدرجة حرارة +500°C. افترض أن كوباً من هذه المادة يزن 67.5 g، وأنه سائل بشكل كامل ودرجة حرارته +500°C. إن قيمة حرارة تبخره 845 cal/g. ما هو مقدار الحرارة المطلوبة مقدرة بالحريرة وبالكيلوحريرة، لغلي السائل بالكامل؟

حل (11-7)

وحداتـــنا مـــتوافقة مـــسبقاً: m مقدرة بالغرام وh_v مقدرة بالحريرة بالغرام. يجب أن نعالج الصيغة السابقة بحيث نجعلها تُعبِّر عن الحرارة h (بالحريرة) بدلالة كميات أخرى معطاة. يمكن القيام بذلك من خلال ضرب طرفي المساواة بالقيمة m، لنحصل على الصيغة التالية:

$$h = h_v m$$

والآن من السهل تعويض الأعداد

$$h = 845 \times 67.5$$
$$= 5.70 \times 10^4 \text{ cal} = 57.0 \text{ kcal}$$

يمكـــن تقريب هذا الجواب بالتدوير إلى ثلاثة أرقام هامة، لأن بيانات الدخل معطاة بهذه الدرجة من الدقة.

امتحان موجز

عــد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. يمكن أن يسبب انخفاض درجة حرارة الغاز
(a) غليانه وتحوله إلى بخار.
(b) تحوّله إلى سائل.
(c) تطبيق ضغط متزايد على الوعاء الصلب.
(d) لا يسبب شيئاً؛ سيبقى غازاً أيا تكن الحالة.

2. افتــرض وجــود إناء يحتوي على 1.000kg من سائل. وحرارته المُميِّزة 1.355cal/g/°C. افترض أن درجــة حرارته تساوي تماماً درجة حرارة التبخر +235.0°C. وأنه جرى نقل طاقة مقدارها 5,420 cal إلى السائل على شكل حرارة. ستكون درجة حرارة السائل في الإناء بعد تطبيق الحرارة
(a) +235.0°C.
(b) +239.0°C.
(c) +231.0°C.
(d) يستحيل حسابها من هذه المعلومات.

3. الوحدة الحرارية الإنكليزية (BTU)
(a) تُعبِّر عن معدل نقل الطاقة، وليس الطاقة الكلية المنقولة.
(b) هي وحدة الحرارة التي يفضِّلها العلماء في بريطانيا.
(c) تساوي 1,000 cal.
(d) تعتمد على الوزن ولذلك تتغيّر قيمتها اعتماداً على الجاذبية.

4. قــضيب معدني طوله 4.5653100 m ودرجة حرارته 36.000 °C. جرى خفض درجة حرارته حتى تقلــص طول القضيب إلى 4.5643000m. قيست درجة الحرارة وكانت 35.552°C. ما هو المُعامل الحراري للتمدد الخطي لهذا المعدن بشكل تقريبــي؟
(a) 0.00225/°C.
(b) 4.94×10^{-4}/°C.
(c) 2.21×10^{-4}/°C.
(d) لا يمكن تحديده من المعلومات المقدمة هنا.

5. افترض أن مادة تغلي وتتكاثف بدرجة حرارة +217 °C. تخيل كوباً من هذه المادة وزنه 135 g وأنه سائل بكامله بدرجة حرارة +217°C وحرارة تبخره 451 cal/g. ما هو مقدار الحرارة، مقدرة بالكيلو حريرة، الضرورية لغلي هذا السائل بشكل كامل؟

(a) 6.089×10^4.

(b) 3.341.

(c) 60.89.

(d) 0.2993.

6. تشير حرارة انصهار المادة إلى

(a) الحرارة الضرورية لإنتاج تفاعل اندماج نووي.

(b) الحرارة اللازمة لتسييل غاز بدرجة حرارة تكاثفه.

(c) الحرارة اللازمة لتسييل جسم صلب بحرارة انصهاره.

(d) درجة الحرارة التي يصبح السائل فيها غازاً.

7. إن درجة الحرارة الأبرد ما يمكن

(a) 0°R.

(b) 0°C.

(c) 0°F.

(d) لا معنى لها؛ لا يوجد درجة حرارة أبرد ما يمكن.

8. تعاني من سعال قاسٍ وتشعر بدوار وضعف وبأنك مستنزف. إنه منتصف الشتاء، ودرجة الحرارة خارجاً تحت 0°F. قستَ درجة حرارتك باستخدام مقياس حرارة ووجدتها 40.2°C. أنت لا تتذكر صيغة التحويل من سلسيوس إلى فهرنهايت، ولكنك تتذكر بأن درجة الحرارة الطبيعية للجسم هي حوالى 98.6°F. استدعيت طبيبك وأخبرته بالقراءة 40.2°C. ماذا يحتمل أن يقول؟

(a) "لا تقلق، درجة حرارتك طبيعية. اشرب بعض الماء".

(b) "لديك حمى شديدة. ليقلّك أحد ما إلى مكتبي، و استرح ولا تحاول أن تقود بنفسك".

(c) إن درجة حرارتك منخفضة قليلاً عن درجة الحرارة الطبيعية. تناول حساء ساخناً.

(d) ماذا فعلت؟ قضيت اليوم بأكمله دون معطف؟ لديك (انخفاض خطير في درجة حرارة الجسم). دعْ أحداً ما يقلك لغرفة الإسعاف. لا تحاول أن تقود بنفسك.

9. درجة الحرارة الأعلى ما يمكن هي

(a) +30,000,000 °F.

(b) + 30,000,000°C.

(c) $+ 30,000,000\ K$.

(d) لا معنى لها، لا يوجد درجة حرارة أعلى ما يمكن.

10. الكيلو حريرة هي وحدة

(a) درجة الحرارة.

(b) الاستطاعة.

(c) الحرارة.

(d) الضغط.

اختبار: الباب الأول

لا تعـد إلى الـنص عـند تقديم هذا الاختبار. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن 37 سؤالاً بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب. يُفضَّل أن يكون لديك صديق يقوم بتدقيق الأجوبة في المـرة الأولى لـتقديمك الاختبار، وبالتالي لن تتذكر الأجوبة وبالتالي يمكنك تقديم الامتحان مرة أخرى إذا رغبت.

1. الجول يكافئ
   (a) نيوتن — متر.
   (b) كيلوغرام — متر.
   (c) وات.
   (d) كانديلا.
   (e) erg.
2. يتجه شعاع تسارع الأرض في دورانها حول الشمس
   (a) خارجاً من الشمس.
   (b) بالاتجاه نفسه للحركة الآنية للأرض.
   (c) داخلاً باتجاه الشمس.
   (d) وفق زاوية قائمة على مستوى دوران الأرض حول الشمس.
   (e) لا يتجه لأي مكان؛ إنه شعاع صفري.
3. أي الكميات التالية لا يمكن التعبير عنها ككمية شعاعية؟
   (a) الإزاحة.
   (b) شعاع السرعة.
   (c) التسارع.

(d) الكتلة.

(e) القوة.

4. تقطع سيارة مسافة 200 km في 3 ساعات (3.00 hr). ما هي السرعة المتوسطة؟

(a) 18.5 m/s

(b) 0.0540 m/s

(c) 54.0 m/s

(d) 66.7 m/s

(e) لا يمكن حسابها اعتماداً على هذه المعلومات.

5. ما هو الفرق بين التفاعل الكيميائي والتفاعل الذري؟

(a) يستلزم التفاعل الكيميائي انشطار أو اندماج النوى، ولكن لا يستلزم التفاعل الذري ذلك.

(b) يستلزم التفاعل الذري انشطار أو اندماج النوى، ولكن لا يستلزم التفاعل الكيميائي ذلك.

(c) يتطلب التفاعل الذري مادة مضادة، ولكن لا يتطلب التفاعل الكيميائي ذلك.

(d) يتطلب التفاعل الكيميائي تفاعلاً ذرياً لإطلاقه.

(e) لا يوجد فرق؛ التفاعل الذري والكيميائي واحد تماماً.

6. ما هو الفرق بين الكتلة والوزن؟

(a) لا شيء، إنها أسماء مختلفة لشيء واحد.

(b) الوزن هو القوة الناتجة من جذب جسم له كتلة.

(c) الكتلة هي القوة الناتجة من جذب جسم له وزن.

(d) تعتمد الكتلة على سرعة الجسم، أما الوزن فلا.

(e) الكتلة هي تعبير عن مقاومة جسم ما للحركة، ولكن الوزن هو تعبير عن عدد الذرات في الجسم.

7. المادة القابلة للطرق بشكل كبير

(a) يمكن طرقها وتحويلها لصفائح رقيقة.

(b) يمكن تبخيرها بدرجة حرارة منخفضة.

(c) تتغير حالتها من الحالة الصلبة إلى الحالة الغازية مباشرة.

(d) لا تنصهر عند تسخينها بل تحترق.

(e) سريعة الانكسار.

8. افترض أنه جرى رفع جسم كتلته 540 g لارتفاع 25.5 m. كم ستبلغ طاقته الكامنة؟ اعتبر أن قيمة طويلة تسارع الجاذبية الأرضي $9.81\ m/s^2$.

(a) 0.208 J

(b) 135 J

(c) 208 J

(d) 463 J

(e) 1.35×10^5 J

9. أي الجُسيْمات التالية تملك الكتلة نفسها تقريباً؟

(a) البروتون والإلكترون.

(b) النيترون والإلكترون.

(c) البروتون والنيترون.

(d) البروتون ونواة الهيليوم.

(e) النيترون ونواة الهيليوم.

10. النيوتن هو وحدة

(a) الكتلة.

(b) التردد.

(c) تسارع الجاذبية.

(d) درجة الحرارة.

(e) ولا عبارة مما ورد أعلاه.

11. يوجد 1.806×10^{24} ذرة في عيِّنة من سائل حجمها 100.0 ml. ما هي الكثافة الكتلية لهذه العيِّنة؟

(a) 1.806×10^{28} mol/cm^3

(b) 1.806×10^{28} g/cm^3

(c) 0.03000 mol/cm^3

(d) 0.003000 mol/m^3

(e) لا يمكن حساب الكثافة الكتلية من المعلومات المعطاة هنا.

12. ما هي المدة التي يستغرقها شعاع ضوئي للانتقال مسافة 3.00×10^{16} km في الفضاء الحر؟

(a) 100 s

(b) 10.0 s

(c) 1.00 s

(d) 0.100 s

(e) 0.0100 s

13. يشمل قانون باسكال سلوك

(a) السوائل المغلقة غير القابلة للانضغاط.

(b) الأجسام في حقول الجاذبية.

(c) الأجسام المبردة لدرجات حرارة منخفضة جداً.

(d) المواد عندما تتغيّر من طور إلى طور آخر.

(e) الجزيئات في الفراغ.

14. يوضح مثال الانتشار

(a) أن دبس السكر أقل "لزوجة" من الماء.

(b) الانتشار التدريجي للصباغ في كأس من الماء دون تحريكه أو هزه.

(c) المواد المبردة لدرجات حرارة منخفضة جداً.

(d) تغير حالة المواد من طور إلى طور آخر.

(e) أي مما ورد أعلاه.

15. يبلغ طول الدائرة الكبيرة بالكيلومتر والتي تصل بين القطب الشمالي الجغرافي للأرض وخط الاستواء؟

(a) 10 ملايين km

(b) 1 مليون km

(c) 100,000 km

(d) 10,000 km

(e) 1,000 km

16. مسند كروي نصف قطره 0.765 cm. كتلته 25.5 g. ما هي كثافته؟

(a) $7.12\ g/cm^3$

(b) $33.3\ g/cm^3$

(c) $57.0\ g/cm^3$

(d) $13.6\ g/cm^3$

(e) لا يمكن حسابها من هذه المعلومات.

17. جسم متحرك طويلة تسارعه ثابتة ومقدارها $a = 3.00\ m/s^2$. انطلق الجسم من السكون في اللحظة الزمنية $t = 0.00\ s$، وتحرك وفق مسار مستقيم. كم ستكون المسافة التي يقطعها بدءاً من نقطة انطلاقه في اللحظة $t = 5.00\ s$؟

(a) 0.120 m

(b) 7.50 m

(c) 15.0 m

(d) 37.5 m

(e) لا يمكن حسابها من هذه المعلومات.

18. في النظام المثالي،

(a) لا يوجد حرارة.

(b) لا يوجد كتلة.

(c) لا يوجد احتكاك.

(d) تتحرك جميع الأجسام بالسرعة نفسها.

(e) تتحرك جميع الأجسام بالاتجاه نفسه.

19. يمكن تحديد المعدّل الذي تُستهلك وفقه الطاقة بدلالة

(a) الجول.

(b) نيوتن — متر.

(c) نيوتن بالمتر.

(d) كيلوغرام — متر.

(e) جول بالثانية.

20. رُفع جسم كتلته 2.00 kg للأعلى مسافة 3.55 m بشكل معاكس لشد الجاذبية على كوكب تسارع جاذبية $5.70\ m/s^2$. ما هو مقدار العمل المُنجز؟

(a) $40.5\ kg{\bullet}m^2/s^2$

(b) $7.10\ kg{\bullet}m^2/s^2$

(c) $11.4\ kg{\bullet}m^2/s^2$

(d) $1.25\ kg{\bullet}m^2/s^2$

(e) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

21. يمكن التعبير عن الحرارة المُميِّزة

(a) بالحريرة بالثانية.

(b) بالكيلو حريرة بالساعة.

(c) Btu بالساعة.

(d) بالحريرة بالغرام.

(e) بالحريرة بالغرام بالدرجة سلسيوس.

22. يتأثر شعاع كمية الحركة بكل مما يلي باستثناء.

(a) سرعة الجسم.

(b) شعاع سرعة الجسم.

(c) كتلة الجسم.

(d) اتجاه تحرك الجسم.

(e) درجة حرارة الجسم.

23. افترض وجود قضيب من معدن معين طوله 1.00 m مُعامله الحراري للتمدد الخطي $3.32 \times 10^{-5}/^{\circ}C$. إذا جرى تسخين القضيب من 10°C إلى 20°C، فكم سيصبح طول القضيب؟

(a) 0.0000332 m

(b) 0.000332 m

(c) 0.00332 m

(d) 0.032 m

(e) لا! لا يزداد طول القضيب، بل سينقص.

24. تزن عيِّنة من المادة 365 µg. كم تساوي هذه القيمة بالكيلوغرام؟

(a) 3.65×10^{5}

(b) 36.5

(c) 0.365

(d) 3.65×10^{-7}

(e) يعتمد ذلك على شدة حقل الجاذبية الذي يجري قياس الكتلة فيه.

25. يستخدم الفيزيائيون عادة مسرِّعات الجُسيْمات

(a) لوزن الأجسام الثقيلة كالصخور الضخمة.

(b) لتحديد كتل المجرات والنجوم البعيدة.

(c) لتصنيع عناصر غير موجودة طبيعياً.

(d) لتفريغ الهواء من الوعاء بشكل كامل.

(e) لتوليد حزم ضوئية قوية.

26. يمكن تطبيق معادلة أينشتاين $E = mc^2$ مباشرة لحساب

(a) الطاقة الناتجة من تفاعل مادة – مادة مضادة.

(b) الطاقة الناتجة من التحليل الكهربائي للماء.

(c) الطاقة الناتجة من تفاعل الأوكسجين مع المعدن لتشكيل الصدأ.

(d) الكتلة الناتجة من ارتباط ذرتي هيدروجين مع ذرة أوكسجين واحدة لتشكيل جزيء الماء.

(e) كتلة الكلور المتحرر من التحليل الكهربائي للماء المالح.

27. يساوي شعاع سرعة الجاذبية على سطح الأرض
(a) 9.8 m تقريباً.
(b) 9.8 m/s تقريباً.
(c) $9.8\ m/s^2$ تقريباً.
(d) $9.8\ m/s^3$ تقريباً.
(e) لا يساوي أي قيمة من القيم الواردة أعلاه؛ إن عبارة "شعاع سرعة الجاذبية" لا معنى لها.

28. افتـــرض أن مادة مُعيَّنة تنصهر وتتجمد بدرجة حرارة +200°C. تخيل كتلة من المادة كتلتها 500 g، وهــي صلبة في الدرجة +200°C بشكل كامل. وافترض أنها معرضة للحرارة وهي في حالة انصهار. افترض أنها تستهلك 50,000 cal من الطاقة لصهر المادة كلياً وتحويلها إلى سائل بشكل كامل بالدرجة +200°C ما هي حرارة انصهار هذه المادة؟
(a) لا يمكن تحديدها من هذه المعلومات.
(b) 0.100 cal/g
(c) 1.00 cal/g
(d) 10.0 cal/g
(e) 100 cal/g

29. يشير مصطلح *حرارة التبخر* إلى
(a) كمية الحرارة الضرورية لتحويل كمية معينة من مادة في الحالة السائلة إلى الحالة الغازية.
(b) كمية الحرارة الضرورية لتحويل كمية معينة من مادة في الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة.
(c) الحرارة الناتجة من تبخر المادة.
(d) الحرارة الممتصة عند تسييل المادة.
(e) جهاز مستخدم لتبخير الماء.

30. نظام الوحدة – الدولية الأساسية لنصوع الضوء المرئي هي
(a) اللومن.
(b) اللكس.
(c) الكانديلا.
(d) الجول.
(e) الوات.

31. ما هو الفرق الرئيسي بين السرعة وشعاع السرعة؟
(a) يعتمد شعاع السرعة على الجاذبية، و لا تعتمد السرعة على ذلك.

(b) يعتمد شعاع السرعة على الكتلة، و لا تعتمد السرعة على ذلك.

(c) يعتمد شعاع السرعة على القوة، و لا تعتمد السرعة على ذلك.

(d) يعتمد شعاع السرعة على الاتجاه، ولا تعتمد السرعة على ذلك.

(e) لا يوجد أي فرق؛ يُمثّل شعاع السرعة والسرعة الشيء نفسه تماماً.

32. يمكن تحديد الطاقة الكامنة بدلالة

(a) نيوتن — متر.

(b) متر بالثانية مربع.

(c) كيلوغرام بالثانية.

(d) كيلوغرام بالمتر.

(e) كيلو غرام — متر.

33. تنتقل سيارة كتلتها 900 kg شرقاً على طريق سريع بسرعة 50.0 km/h. ما هي طويلة شعاع كمية حركة هذه السيارة؟

(a) 450 kg•m/s

(b) 1.25×10^4 kg•m/s

(c) 4.50×10^6 kg•m/s

(d) 2.25×10^6 kg•m/s

(e) 6.48×10^4 kg•m/s

34. عُد إلى السؤال 28 من الاختبار. ما هي حرارة تبخر هذه المادة؟

(a) لا يمكن تحديدها من هذه المعلومات.

(b) 0.100 cal/g

(c) 1.00 cal/g

(d) 10.0 cal/g

(e) 100 cal/g

35. جرى إسقاط قطعة رخام كتلتها 1.5g، وقطعة طوب كتلتها 5.5kg من الارتفاع نفسه على القمر. ما هو الجسم الذي سيضرب سطح القمر بقوة أكبر؟

(a) الرخام ؛ لأن كتلة الرخام تتركز في حجم أصغر.

(b) الطوب؛ كتلته أكبر، "وتنجذب" بقوة أكبر.

(c) سيضربان سطح القمر بالقوة نفسها.

(d) السؤال لا معنى له لمساهمة وحدات غير متوافقة.

(e) نحتاج لمزيد من المعلومات لتحديد الجواب.

36. مقياس رانكين

(a) هو المقياس المئوي نفسه.

(b) له تدريجات المقياس المئوي نفسها، ولكن نقطة الصفر مختلفة.

(c) له تدريجات مقياس فهرنهايت نفسها، ولكن نقطة الصفر مختلفة.

(d) يستخدم بشكل واسع من قبل العموم في الدول الأوروبية.

(e) مُفضّل عند التحدث عن درجات الحرارة المرتفعة جداً.

37. أي من العبارات التالية صحيحة دائماً؟

(a) التسارع هو تمثيل كمي لتغيّر شعاع سرعة جسم متحرك.

(b) يتجه شعاع تسارع جسم متحرك دائماً باتجاه شعاع السرعة نفسه.

(c) يمكن أن يتغيّر شعاع السرعة الآنية لجسم متحرك حتى لو بقي الاتجاه ثابتاً.

(d) يمكن أن يتغيّر شعاع السرعة الآنية لجسم متحرك حتى لو بقيت السرعة ثابتة.

(e) السرعة كمية سلمية.

38. إذا انتُزع إلكترون من ذرة حيادية كهربائياً، فالنتيجة هي

(a) نظير مختلف للعنصر نفسه.

(b) عنصر مختلف.

(c) تفاعل نووي.

(d) تغير في العدد الذري.

(e) و لا عبارة مما ورد أعلاه.

39. ارتفعت درجة حرارة غرفة بمقدار 10 k. ماذا تساوي هذه القيمة بالفهرنهايت؟

(a) 18ºF

(b) 5.6ºF

(c) 10ºF

(d) 273.15ºF

(e) لا يمكن حسابها من هذه المعلومات.

40. العدد الذري لعنصر ما يساوي تقريباً

(a) مجموع عدد البروتونات والنيترونات في النواة.

(b) عدد البروتونات في النواة.

(c) عدد النيترونات في النواة.

(d) مجموع عدد البروتونات والإلكترونات.

(e) مجموع عدد النيترونات والإلكترونات.

41. تملك ذرة الكربون العادية ستة نيترونات وستة بروتونات في نواها. لو انتزع بروتون واحد من النواة بطريقة ما دون تغيير أي مظهر من مظاهر الذرة الأخرى، ما هو أفضل وصف للذرة الجديدة؟

(a) ستكون نظيراً مختلفا للكربون.

(b) ستكون أيون كربون سالباً.

(c) ستكون أيون كربون موجباً.

(d) ستكون ذرة عنصر مختلف.

(e) و لا عبارة مما ورد أعلاه.

42. افترض وجود حجرة مغلقة يمكن تكبير وتصغير حجمها. الحجرة موجودة في مختبر على سطح الأرض. تحتوي الحجرة على N مول من جزيئات الأوكسجين. جرى تخفيض حجم الحجرة بسرعة دون إضافة أو نزع أي من الجزيئات. سيحدث كل مما يلي *باستثناء*

(a) انخفاض درجة حرارة الأوكسجين.

(b) ازدياد الكثافة الكتلية للأوكسجين.

(c) تطبيق الأوكسجين ضغطاً متزايداً على جدران الحجرة.

(d) ستزداد الكثافة الجُسيْمية للأوكسجين.

(e) ستزداد الكثافة الوزنية للأوكسجين.

43. الحرارة هي تعبير عن

(a) إشعاع الطاقة.

(b) حمل الطاقة.

(c) نقل الطاقة.

(d) تحويل الطاقة.

(e) الطاقة الحركية.

44. ترتبط الطاقة والكتلة بشكل مطلق ووثيق وفقاً لفرضية ألبرت أينشتاين

(a) بالجاذبية.

(b) .بمعدل نقل الطاقة.

(c) .بمعدل نقل الكتلة.

(d) .بمربع سرعة الضوء.

(e) بشدة التسارع.

45. افترض أنه تم استخدام محرك لقيادة نظام ميكانيكي. يستجر المحرك W 500 من مُزوِّد القدرة الذي يُشغِّله، والاستطاعة الميكانيكية المنتجة من قبل النظام 400W. ما هو مردود هذا النظام، مُعبِّرا عنه كنسبة؟

(a) 0.800

(b) 1.25

(c) 80.0

(d) 125

(e) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

46. وُضعت عيِّنة من المادة على طاولة. بحيث تحافظ على شكلها. اعتماداً على هذه المعلومات، يمكن أن نكون متأكدين من أن هذه المادة هي

(a) غاز.

(b) سائل.

(c) جسم صلب.

(d) جامدة.

(e) أقل كثافة من الطاولة.

47. وحدة القوة في النظام الدولي هي

(a) الغرام.

(b) الداين.

(c) الباوند (الرطل الإنكليزي).

(d) الكيلوغرام.

(e) النيوتن.

48. البوزيترون هو

(a) بروتون.

(b) بروتون المضاد.

(c) إلكترون.

(d) إلكترون مضاد.

(e) لا شيء؛ لا يوجد شيء اسمه البوزيترون.

49. املأ الفراغات بحيث تكون الجملة التالية صحيحة:"المادة التي تظهر كسائل بلزوجة منخفضة في ___________ واحد يمكن أن تظهر كسائل بلزوجة عالية، حتى في درجة الحرارة والضغط، عند ملاحظتها في ___________ آخر.

(a) حقل جاذبية.
(b) وعاء.
(c) كمية.
(d) المعنى الزمني.
(e) حالة المادة.

50. الميغا هرتز (MH_2) هي وحدة

(a) الكتلة.
(b) الزمن.
(c) السرعة.
(d) الكمية.
(e) ولا عبارة مما ورد أعلاه.

الباب الثاني

الكهرباء، والمغنطيسية، والإلكترونات

الفصل 12

التيار المستمر

إنك تفهم الرياضيات الفيزيائية بشكل جيد الآن، وتعلم أسس الفيزياء الكلاسيكية. حان الآن وقت التعمق في كيفية عمل الأشياء التي لا يمكن ملاحظتها مباشرة. يتضمن ذلك الجُسيْمات، والقوى فيما بينهما، والتي تُتيح لك إنارة المنزل، والاتصال آنيا بالأشخاص في الجانب الآخر من العالم، وفي الحالة العامة القيام بأشياء كانت تُعتبر سحرية قبل عدة أجيال خلت.

ماذا تفعل الكهرباء

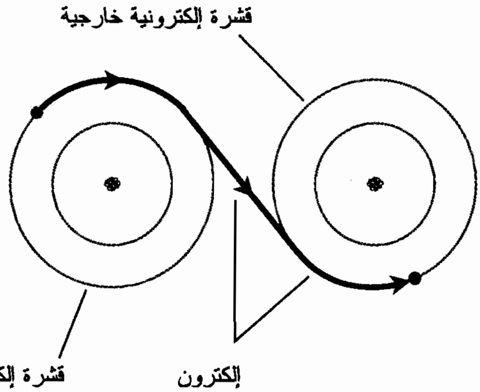
عند تناولنا لمادة الفيزياء في المدرسة المتوسطة، قمنا باستخدام جهاز إسقاط 16 ميلي متر بفيلم ضوئي. أرانا مُدرِّسنا بضعة أفلام صُنعت من قبل بروفيسور مشهور. لن ننسى أبداً نهاية إحدى المحاضرات، والتي قال البروفسور فيها،"نحن نُقيِّم الكهرباء ليس بمعرفة ماهيتها، بل بالتمعن فيما تفعل". كانت تلك العبارة عظيمة. إنها تُعبِّر حقيقة عن كامل الفلسفة المتعلقة بالفيزياء الحديثة، ليس فقط في الكهرباء بل أيضاً في جميع الظواهر غير الملموسة مباشرة. دعنا نتابع بعض ما تقوم الكهرباء به.

النواقل

تنتقل الإلكترونات من ذرة إلى ذرة بسهولة في بعض المواد، وبصعوبة في بعض المواد الأخرى. ويستحيل في بعض المواد انتقال الإلكترونات من ذرة إلى ذرة. *الناقل الكهربائي* هو مادة تكون فيها الإلكترونات ذات حركية عالية.

إن أفضل ناقل، على الأقل بين المواد الشائعة، في درجة حرارة الغرفة هو عنصر الفضة الصافي. يُعتبر النحاس والألمنيوم أيضاً ناقلَيْن كهربائيَّيْن ممتازيْن. وكذلك الحديد، والفولاذ، ومعادن متنوعة أخرى، هي نواقل جيدة للكهرباء باعتدال. وتُعتبر بعض السوائل نواقل جيدة أيضاً. والزئبق أحد هذه الأمثلة. الماء المالح ناقل معتدل. وتُعتبر الغازات عموماً نواقل ضعيفة لأن الذرات والجزيئات متباعدة جداً بحيث لا تسمح بتبادل الإلكترونات الحرة. ولكن، إذا تأيَّن الغاز، يمكن أن يصبح ناقلاً متوسطاً للكهرباء.

لا تنتقل الإلكترونات في الناقل على شكل سيل منتظم كانتقال جزيئات الماء في خرطوم الحديقة. إنها تنـــتقل مـــن ذرة إلى ذرة (الـــشكل (12-1)). يحدث ذلك في عدد غير محدود من الذرات كل الوقت. بالنتيجة، يمر تريليونات من الإلكترونات من نقطة معروفة كل ثانية في دارة كهربائية نموذجية.



الشكل (12-1): تنتقل الإلكترونات في الناقل الكهربائي من ذرة إلى ذرة بسهولة. هذا الرسم مُبسط بشكل كبير.

تخـــيّل صفاً طويلاً من الناس، يُمرر كل واحد كرة وبشكل ثابت إلى جاره أو جارته التي تقف إلى يميـــنه. إذا وُجـــدت وفرة من الكرات في هذا الصف، وإذا مرر كل شخص الكرة بمجرد حصوله عليها، فالنتـــيجة هي سيل منتظم للكرات المتنقلة على طول الصف. يُمثّل ذلك ناقلاً جيداً. إذا أصبح الأشخاص متعبين أو بطيئين ولا يُمررون الكرات بشكل جيد، ينخفض معدل التدفق. ولا يُعتبر الناقل جيداً جداً.

العوازل

إذا رفـــض الأشخاص تمرير الكرات على طول الصف في المثال السابق، سيُمثّل الصف عندها *عازلاً كهربائياً*. تمنع مواد كهذه تدفق التيارات الكهربائية، باستثناء كميات صغيرة جداً في ظروف معينة.

إن معظـــم الغازات عبارة عن عوازل كهربائية جيدة (لأنها نواقل ضعيفة). يُمثّل الزجاج، والخشب الجاف، والورق، والبلاستيك، أمثلة أخرى للعوازل. يُمثّل الماء النقي عازلاً كهربائياً جيداً، على الرغم من أنـــه ينقل بعض التيار عندما تكون بعض المعادن منحلة فيه. يمكن أن تُشكّل أكاسيد المعادن عوازل جيدة، على الرغم من أن المعدن بشكله النقي هو ناقل جيد.

تُدعى المادة العازلة في بعض الأحيان *بالعازل الكهربائي*. ظهر هذا المصطلح من حقيقة احتفاظ العازل بالشحنات الكهربائية، مانعاً تدفق الإلكترونات التي ستُعادل الفرق في الشحنة بين المكانين. يمكن استخدام المـــواد العازلة الممتازة للاستفادة منها في بعض المُكوِّنات الكهربائية المعينة كالمكثفات، حيث تُشكّل عدم قـــدرة الإلكتـــرونات علـــى الـــتدفق بانتظام حالة هامة. عند وجود منطقتين منفصلتين تملكان شحنتين كهـــربائيتين متعاكستين بالقطبية (تدعى: *زائد وناقص* أو *موجب وسالب* أو + و−) وقريبتين من بعضهما ولكن تفصل بينهما مادة عازلة، يدعى هذا الزوج من الشحنات بثنائي القطب الكهربائي.

المقاومات

تـــنقل بعـــض المواد كالكربون الكهرباء بشكل جيد إلى حدّ ما ولكن ليس بشكل جيد جداً. يمكن تعـــديل ناقلـــية الكـــربون بإضافة الشوائب كالصلصال إلى عجينة الكربون. تدعى المُكوِّنات الكهربائية المـــصنوعة بهذه الطريقة المقاومات. إن المقاومات هامة في الدارات الإلكترونية لأنها تسمح بالتحكم بتدفق التـــيار. كلما انخفضت قيمة المقاومة، كلما ازدادت ناقليتها؛ وكلما ازدادت قيمة المقاومة، كلما انخفضت ناقليتها.

تُقـــاس المقاومـــة الكهربائية *بالأوم*، ويُرمز لها في بعض الأحيان بالحرف اللاتيني الكبير أوميغا (Ω). سنستخدم في هذا الكتاب الرمز Ω في بعض الأحيان وسنستخدم في أحيان أخرى الكلمة *أوم*، لذا ستتعود علـــى هاتين العبارتين. كلما كانت قيمة الأوم أكبر، كلما ازدادت قيمة المقاومة، وكلما ازدادت صعوبة تدفق التيار. يُفضل عادةً في النظام الكهربائي أن تكون المقاومة منخفضة قدر الإمكان أو أن تكون المقاومة الأومية منخفضة، لأن المقاومة تُحول الطاقة الكهربائية إلى حرارة. تدعى هذه الحرارة بالفقدان الناجم عن المقاومة وتُمثّل في معظم الحالات طاقة ضائعة. تُخفّض الأسلاك الثخينة والجهود العالية الفقدان الناجم عن المقاومة في الخطوط الكهربائية طويلة المسافة. وهذا هو سبب توظيف الأبراج الكبيرة ذات الجهود الخطيرة في نظم الشبكات العامة الكبيرة.

التيار

أيـــنما توجد حركة لحوامل الشحنة في المادة، يوجد *تيار كهربائي*. يُقاس التيار بدلالة عدد *حوامل الشحنة* أو الجُسيْمات التي تحوي وحدة الشحنة الكهربائية، المارة من نقطة واحدة في 1 ثانية.

تُـــصنَّف حـــوامل الشحنة وفق شكلين رئيسيين: الإلكترونات، والتي تملك وحدة الشحنة السالبة، *والثقوب*، وهي غياب الإلكترون في الذرات والتي تحمل وحدة الشحنة الموجبة. تستطيع الأيونات التصرف كحـــوامل شحنة، تستطيع نوى الذرات في بعض الحالات التصرف كذلك أيضاً. تحمل هذه الأنواع من الجُـــسيْمات أضـــعاف العدد الكلي لوحدة الشحنة الكهربائية. يمكن أن تكون الأيونات موجبة أو سالبة القطبية، ولكن النوى الذرية دائماً موجبة.

حـــتى لو كان التيار صغيراً، يمر عادةً عدد ضخم من حوامل الشحنة من نقطة محددة في 1 ثانية. في دارة كهـــربائية منـــــزلية، يستجر المصباح الكهربائي تياراً بحوالى 6 كوانتيلون حامل شحنة (6×10^{18}) بالثانـــية. يُمـــرر أصغر مصباح عدداً ضخماً من حوامل الشحنة كل ثانية. من الحماقة التحدث عن التيار بدلالـــة حـــوامل الشحنة بالثانية، لذا يقاس بدلاً من ذلك *بالكولون بالثانية*. ويساوي *الكولون* (ويُرمز له بالحرف C) تقريباً 6.24×10^{18} إلكترون أو ثقب. يدعى التيار الذي يساوي 1 كولون بالثانية (1 C/s) **بالأمـــبير** (ويُرمز له بالحرف A)، وهو الوحدة القياسية للتيار الكهربائي. يستجر مصباح 60 – W حوالى **0.5 A** من التيار.

تُـــولّد الحرارة عندما يتدفق التيار في المقاومة – وهذا ما يحدث دائماً، لأنه حتى أفضل النواقل تملك

مقاومة. يجري في بعض الأحيان إصدار ضوء مرئي وإصدار أشكال أخرى من الطاقة أيضاً. إن المصباح الكهربائي مصمم عمداً بحيث تُولِّد مقاومته ضوءاً مرئياً. ولكن تكون، حتى أفضل المصابيح توهجاً ضعيفة المردود، حيث تُنتج حرارة أكثر مما تُنتج من الطاقة الضوئية. إن مصابيح الفلوريسنت أفضل؛ إنها تُنتج ضوءاً أكثر مما تُنتج من الحرارة من أجل كمية معلومة من التيار. أو بشكل آخر تحتاج مصابيح الفلوريسنت لتيار أقل لإصدار كمية معينة من الضوء.

في الفيزياء، يتدفق التيار الكهربائي نظرياً من القطب الموجب إلى القطب السالب. يُدعى هذا التيار *بالتيار الاصطلاحي*. إذا وصلت مصباحاً ضوئياً ببطارية، عندها سيتدفق التيار الاصطلاحي ليخرج من النهاية الموجبة ويدخل في النهاية السالبة. ولكن، تتدفق الإلكترونات التي تشكل النمط الرئيسي لحوامل الشحنة في السلك والمصباح، بالاتجاه المعاكس، أي من القطب السالب إلى القطب الموجب. يفكر المهندسون بهذه الطريقة عادةً.

الكهرباء الساكنة (الستاتيكية)

يمكن أن تتزايد حوامل الشحنة وخاصة الإلكترونات، أو تتناقص في الأجسام دون أن تتدفق إلى أي مكان. ربما جربت ذلك عندما مشيت على سجادة أثناء الشتاء أو مشيت في مكان كانت الرطوبة فيه منخفضة. تنشأ زيادة أو نقص في الإلكترونات على جسمك مما يكسبك شحنة *كهربائية ساكنة*. تدعى ساكنة لأنها لا تنتقل إلى أي مكان. لن تشعر بها حتى تلمس جسماً معدنياً موصولاً بأرضي كهربائي أو موصولاً بجهاز مُثبت في البناء، ثم يحصل التفريغ، مترافقاً بشرارة أو صدمة كهربائية صغيرة. إن ما يسبب هذا الإحساس هو التيار أثناء التفريغ.

لو أصبحت شحنتك أكبر، سيقف شعرك لأن كل شعرة ستتنافر مع الشعرات الأخريات. تتنافر الأجسام التي تحمل الشحنة الكهربائية نفسها، الناتجة عن زيادة أو نقصان الإلكترونات. إذا كنت مشحوناً بشحنة كبيرة، قد تمتد الشرارة بضعة سنتمترات. إن شحنة كهذه خطيرة. لحسن الحظ، لا تحدث الشحنة الكهربائية الساكنة (تدعى *الإلكتروستاتيك*) بهذا الحجم مع الأحذية والسجادة العادية. ولكن، يستطيع جهاز يدعى *مُولِّد فان دوغراف* والموجود في بعض مختبرات الفيزياء في الصفوف الثانوية أن يُسبب شرارة بهذا الحجم. يجب أن تكون حذراً عند استخدام هذا الجهاز في التجارب الفيزيائية.

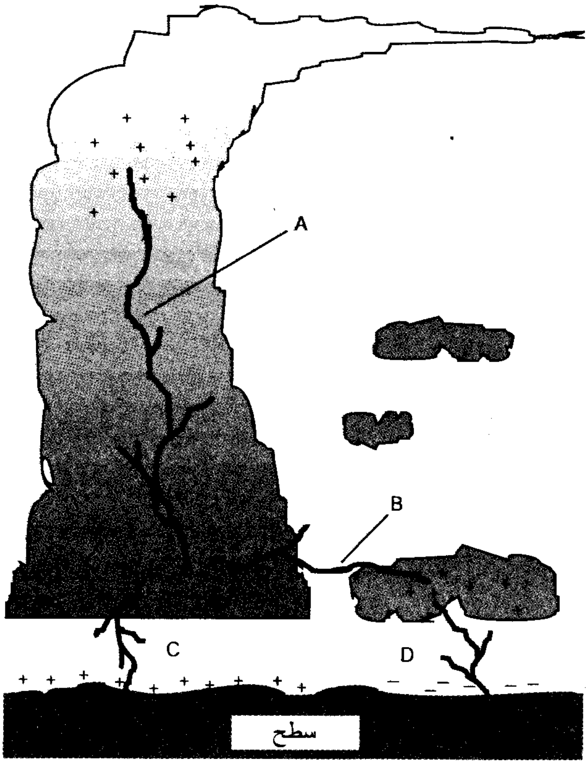
يحدث البرق بين الغيوم، وبين الغيوم والسطح في المدى الواسع للغلاف الجوي للأرض. تُعتبر هذه الشرارة نسخة كبيرة جداً عن الشرارة الصغيرة التي تحصل بعد مشيك على السجادة. حتى تحدث الشرارة، يجب أن تكون الغيوم مشحونة بشحنة كهربائية ساكنة، حيث تكون الشحنات بين الغيوم المختلفة أو بين أجزاء من الغيمة والأرض. يوضح الشكل (12-2)، أربعة أنواع للبرق. يمكن أن يحدث التفريغ داخل غيمة واحدة (*برق داخل الغيمة*، القسم أ)، ويمكن أن يحدث البرق بين غيمتين مختلفتين (*برق بين الغيوم*، القسم ب) أو بين غيمة وسطح الأرض (*برق من غيمة- إلى- الأرض*، القسم ج) أو بين سطح الأرض وغيمة (*برق من سطح الأرض- إلى- غيمة*، القسم د)، إن اتجاه تدفق التيار في هذه الحالات هو

اتجــاه انتقال الإلكترونات نفسه. في البرق من غيمة- إلى- الأرض، والبرق من أرض- إلى- غيمة، تتدفق الــشحنة الموجودة على سطح الأرض تحت غيمة العاصفة الرعدية كالظل عند هبوب العاصفة مع الرياح السائدة.

يمكن أن يصل تيار البرق إلى مليون A. ولكن، يحدث البرق لجزء من الثانية. ومع ذلك، يُزاح الكثير من الكولونات في صاعقة البرق الواحدة.

القوة المحركة الكهربائية

يــستطيع التــيار أن يتدفق فقط إذا تلقى "دفعة". يمكن تزويد هذه الدفعة بواسطة زيادة الشحنات الإلكتروســتاتيكية، كمــا في حالــة ضربة الصاعقة. عندما تتزايد الشحنة ذات القطبية الموجبة (نقص في الإلكتــرونات) في مكــان ما وتتزايد الشحنة ذات القطبية سالبة (زيادة في الإلكترونات) في مكان آخر، تــتواجد *قــوة محركة كهربائية* (emf) قوية. يُدعى هذا التأثير أيضاً *بالجهد أو الكمون الكهربائي*، ويُقاس *بالفولت* (ويُرمز له بالحرف V).



الشكل (12-2): (أ) يمكن أن يحدث البرق في غيمة واحدة (داخل الغيمة)، (ب) أو بين الغيوم (داخل الغيوم) أو بين غيمة وسطح الأرض (ج) بين غيمة إلى الأرض أو (د) من الأرض إلى غيمة.

يتراوح الجهد الفعال للكهرباء المنزلية العادية بين 110 V و130 V؛ ويكون عادةً 117 V. تبلغ قيمة emf لبطارية السيارة 12 V (6 V في بعض النظم الأقدم). يمكن أن تبلغ الشحنة الساكنة التي تكتسبها عندما تمشي على سجادة وأنت تنتعل حذاء صلب النعل بضعة آلاف من الفولتات. يبلغ الجهد ملايين الفولتات قبل تفريغ البرق.

ستسبب emf قيمتها 1 V، عبر مقاومة 1 Ω، تدفق تيار قيمته 1 A. إنها علاقة اصطلاحية في الكهرباء ويُصرَّح عنها عادةً *بقانون أوم*. إذا تضاعفت emf، يتضاعف التيار. إذا تضاعفت المقاومة، ينخفض التيار إلى النصف. ستتم تغطية هذا القانون الكهربائي بالتفصيل لاحقاً.

يستحيل أن يكون لدينا emf دون أن يكون لدينا تدفق للتيار. إنها الحالة التي تسبق حدوث البرق وتسبق لمسك لجسم معدني بعد المشي على السجادة. وينطبق ذلك أيضاً على طرفي المصباح عند إغلاق القاطعة. وينطبق ذلك على البطارية الجافة عند عدم وصل أي شيء بها. لا يوجد أي تيار، ولكن يمكن للتيار أن يتدفق بوجود ناقل يصل بين النقطتين.

قد لا تؤدي قوة emf الكبيرة لمرور تيار كبير في ناقل أو مقاومة. يُعتبر جسمك بعد المشي على السجادة مثالاً جيداً. وعلى الرغم من ذلك يبدو الجهد كبيراً بدلالة الأعداد (آلاف)، وليس عدة كولونات من الشحنة تستطيع التراكم بشكل طبيعي على جسم بحجم جسدك. لذلك، لا يتدفق نسبياً الكثير من الإلكترونات عبر إصبعك، عندما تلمس جسماً معدنياً. بالنتيجة لن تتلقى صدمة مؤذية.

بشكل معاكس، في حال توفر الكثير من الكولونات، يمكن أن يؤدي الجهد المتوسط كجهد قيمته 117 V (أو حتى أقل) لتدفق تيار قاتل. وهذا هو سبب خطورة إصلاح الجهاز الكهربائي الذي يكون في حالة تغذية. إنها الطريقة التي يستطيع بها مُزوِّد القدرة ضخ عدد غير محدود من كولونات الشحنة في جسمك إذا كنت أحمقاً كفاية ووضعت نفسك في هذا الوضع.

المخططات الكهربائية

لفهم كيفية عمل الدارات الكهربائية، يجب أن تكون قادراً على قراءة مخططات التوصيل الكهربائية، والتي تدعى *بالمخططات التخطيطية*. تستخدم هذه المخططات الرموز *التخطيطية*. وهي الرموز الأساسية. فكر بها على أنها تشبه أبجدية لغة ما كاللغة الصينية أو اليابانية، حيث تُمثّل الأشياء بصور قليلة. ولكن، قبل أن تخاف من هذه المقارنة، من المؤكد أنه سيكون من الأسهل لك تعلّم علم الرموز التخطيطية من تعلّم اللغة الصينية (إلا إذا كنت قد تعلمت الصينية سابقاً!).

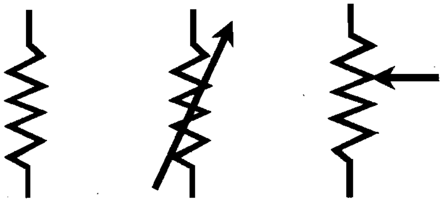
الرموز الأساسية

إنّ الرمز التخطيطي الأبسط هو ذلك الذي يُمثّل سلكاً أو ناقلاً كهربائياً: خط مستقيم مستمر. تُستخدم الخطوط المُنقّطة في بعض الأحيان لتمثيل النواقل، ولكن تستخدم الخطوط المُنقّطة عادةً لتجزئة

المخططـــات إلى مُكوِّناتها من الدارات، أو للإشارة لتداخل مُكوِّنات معينة مع بعضها، أو للإشارة إلى أنها تعمـــل مـــع بعـــضها على مراحل. تُرسم خطوط الناقل دائماً تقريباً إما أفقياً أو عامودياً إلى أعلى وأسفل الـــصفحة بحيث تكون حوامل الشحنة التخيلية مجبرة على السير بتشكيل يشبه تشكيل الجنود. يحافظ ذلك على المخطط مُنظَّماً وسهل القراءة.

عندما يتقاطع خطا ناقلين، يكونان غير موصولين في نقطة التقاطع إلا إذا تم وضع نقطة سوداء كبيرة عـــند تلاقي الخطين. يجب أن تكون نقطة اتصال النواقل ظاهرة بشكل واضح، ولا مشكلة في عدد النواقل المتلاقية في الوصلة.

يُـــشار إلى *المقاومة* بخط متعرج. ويُشار إلى *المقاومة المتغيرة* بخط متعرج مع وجود سهم عليه أو بخط متعرج مع سهم يتجه إليه. إن هذه الرموز موضحة في الشكل (12-3).



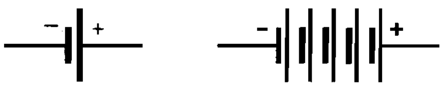
(أ) (ب) (ج)

الشكل (12-3): (أ) مقاومة ثابتة. (ب) مقاومة متغيرة بنهايتين. (ج) مقاومة متغيرة بثلاث نهايات.

تُمـــثِّل *الخلـــية الكهركيميائية* بخطين متوازيين، أحدهما أطول من الآخر. يُمثِّل الخط الأطول النهاية الموجـــبة. تُمـــثِّل *الـــبطارية* عدة خلايا موصولة تسلسلياً ويُشار إليها بسلسلة متعاقبة من الخطوط المتوازية طويل-قصير-طويل-قصير. يوضح الشكل (12-4) رموز الخلية والبطارية.

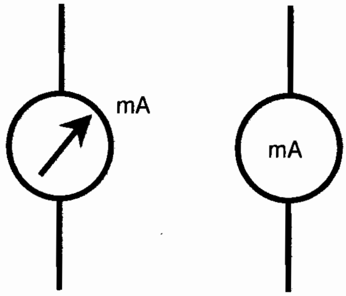
بعض الرموز الأخرى

يُـــشار إلى *المقايـــيس* بدوائـــر. قد تحتوي الدائرة في بعض الأحيان على سهم بداخلها، وعلى نوع المقـــياس، مـــثلاً mA (مقـــياس ميلي أمبير) أو V (مقياس فولت)، حيث يكون مكتوباً بمحاذاة الدائرة، كمـــا هـــو موضح في الشكل (12-5-أ). يُشار في بعض الأحيان إلى نوع المقياس داخل الدائرة مع عدم وجود سهم (انظر إلى الشكل (12-5-ب)). لا تهتم بالطريقة التي يُشار بها للمقياس طالما أنك تعمل على مخطط مُعمم.



(أ) (ب)

الشكل (12-4): (أ) خلية كهركيميائية. (ب) بطارية.



الشكل (12-5): رموز المقياس: (أ) المسمى خارجاً؛ (ب) المسمى داخلاً.

يوضح الشكل (12-6) بعض الرموز الشائعة الأخرى التي تتضمن، مصباحاً، ومكثفاً، وملفاً بقلب هوائي، وملفاً بقلب معدني، وأرضي الهيكل، وأرضي الأرض، ومُزوِّد التيار المتناوب (AC)، ومجموعة من النهايات، والصندوق الأسود (والذي يُرمز لأي شيء تقريباً)، وهو عبارة عن مستطيل مع مُسمّى مكتوب داخله.

دارات الجهد/التيار/المقاومة

في النهاية، يمكن اختصار معظم دارات التيار المستمر (dc) إلى ثلاثة مُكوِّنات رئيسية وهي: مُزوِّد الجهد، ومجموعة النواقل، والمقاومة. إن ذلك موضح في المخطط التخطيطي في الشكل (12-7). E هو جهد مُزوِّد القوة emf (أو في بعض الأحيان V)؛ يدعى التيار المار في الناقل I؛ وتدعى المقاومة R. الوحدات القياسية لهذه المُكوِّنات هي الفولت (V)، والأمبير (A)، والأوم (Ω)، بالترتيب. لاحظ الحروف المائلة والحروف غير المائلة. تُمثّل الحروف المائلة متحولات رياضية؛ وتُمثّل الحروف غير المائلة رموز الوحدات.

تعلم مسبقاً بوجود علاقة بين هذه الكميات الثلاث. إذا تغيرت إحدى هذه الكميات، ستتغير كمية أخرى أو ستتغير كل من الكميتين. إذا صغرت المقاومة، سيصبح التيار أكبر. إذا صغر مُزوِّد emf، سينخفض التيار، وسيزداد الجهد على المقاومة. توجد علاقة رياضية بسيطة بين الكميات الثلاث.

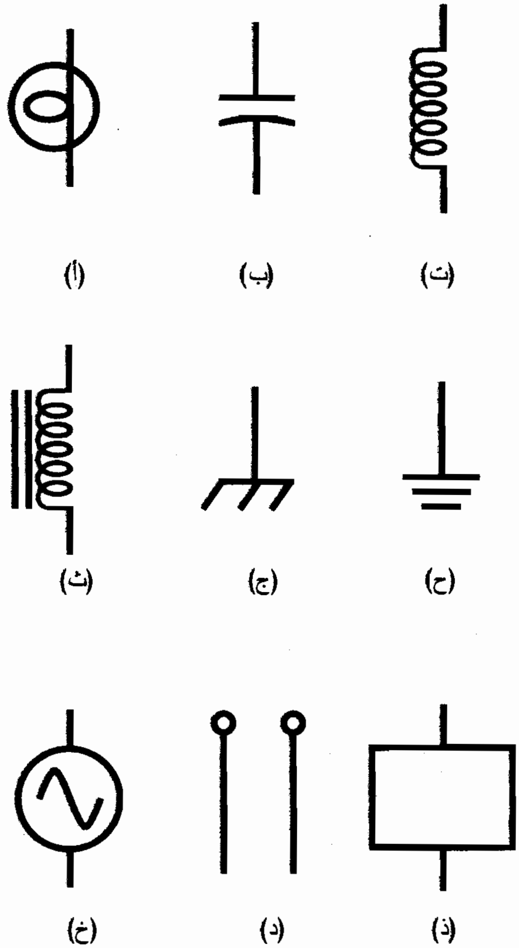
قانون أوم

يُدعى اعتماد كل من التيار، والجهد، والمقاومة في دارات dc على بعضهم البعض *بقانون أوم* وسُمِّي هذا القانون بهذا الاسم نسبة للعالم الذي يُفترض أنه أول من سماه. تُشير ثلاث صيغ لهذا القانون:

$$E = IR$$

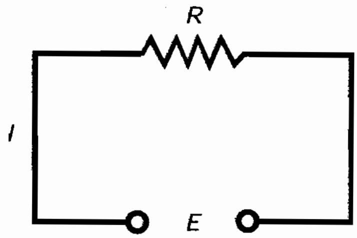
$$I = E/R$$

$$R = E/I$$



الشكل (12-6): الرموز التخطيطية الأكثر شيوعاً:

(أ) مصباح متوهج؛ (ب) مكثف ثابت القيمة؛ (ت) وشيعة بقلب هوائي؛ (ث) وشيعة بقلب معدني؛ (ج) أرضي الهيكل: (ح) ارضي الأرض؛ (خ) مُزوِّد **ac**؛ (د) نهايات؛ (ذ) صندوق أسود.



الشكل (12-7): دارة dc بسيطة. الجهد E، والتيار I، والمقاومة R.

تحتاج فقط لتذكر أول هذه الصيغ لتكون قادراً على اشتقاق الصيغ الأخرى. إن الطريقة الأبسط لتذكر هذه الصيغة هي بحفظ الاختصارات حيث يُمثِّل E اختصار emf، ويُمثِّل I اختصاراً للتيار، ويُمثِّل R اختصاراً المقاومة؛ ثم تذكَّر أنها تظهر بترتيب أبجدي مع إشارة مساواة بعد E، *بالنتيجة* $E = IR$.

من المهم تذكر وجوب استخدام وحدات الجهد، والتيار، والأوم بالترتيب ليعمل قانون أوم بشكل صحيح. إذا استخدمت الفولت، والميلي أمبير (mA)، والأوم أو الكيلو فولت (kV)، والمايكرو أمبير (μA)، والميغا أوم (MΩ)، فلا تتوقع أن تحصل على أجوبة صحيحة. إذا أُعطيتْ المقادير الأولية بوحدات غير الفولت، والأمبير، والأوم، يجب تحويلها لهذه الوحدات ثم إجراء الحساب. بعد ذلك، يمكنك إعادة تحويل الوحدات مرة ثانية لأي شكل تريده. مثلاً، إذا كانت نتيجة حساب المقاومة 13.5 مليون أوم، قد تفضل القول إن النتيجة 13.5 ميغا أوم. ولكن، يجب أن تستخدم في الحساب العدد 13.5 مليون (أو 1.35×10^7) وأن تلتزم بوحدة الأوم.

حسابات التيار

إن الشكل الأول لاستخدام قانون أوم هو إيجاد قيم التيار في دارات dc. بهدف إيجاد التيار، يجب أن تعرف الجهد والمقاومة، أو تكون قادراً على استنتاجهما.

عُد إلى المخطط التخطيطي في الشكل (12–8). إنه يتكون من مُوِّلد dc متغير، ومقياس جهد، وبعض الأسلاك، ومقياس أوم، ومقاومة متغيرة واسعة المجال وقابلة للتعيير. إن القيم الفعلية للمُكوِّنات غير موضحة هنا، ولكن يمكن إسناد قيم لها بهدف الحصول على عيِّنات لمسائل تتعلق بقانون أوم. في المسائل اللاحقة وأثناء حساب التيار، من الضروري "تذكر" المقياس ذهنياً.

مسألة (12–1)

افترض أن مُوِّلد dc (راجع الشكل (12–8)) يُنتج 15 V، وافترض أنه تم ضبط قيمة المقاومة المتغيرة على 10 Ω. ما هي قيمة التيار؟

حل (12–1)

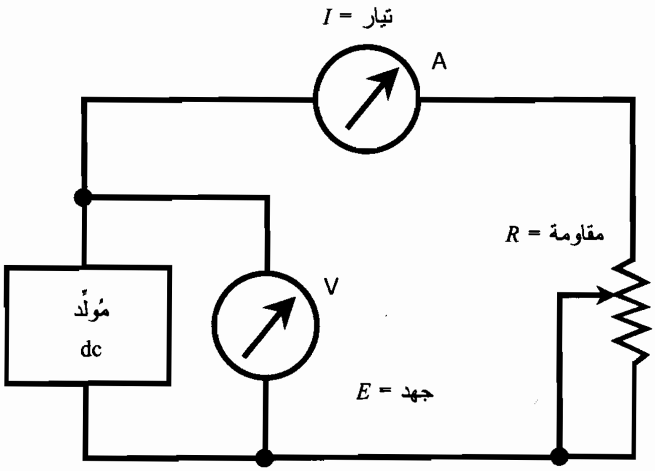
الحل سهل باستخدام الصيغة $I = E/R$. بتعويض قيم E وR؛ حيث يساوي كل منهما 10، لأن الوحدات معطاة بالفولت والأوم. بالنتيجة $I = 10/10 = 1.0$ A.

مسألة (12–2)

يُنتج مُوِّلد dc (راجع الشكل (12–8)) جهداً قيمته 100 V، حيث تم ضبط قيمة المقاومة المتغيرة على 10.0 kΩ. ما هي قيمة التيار؟

حل (12–2)

أولاً، حوِّل المقاومة إلى أوم: 10.0 kΩ = 10,000 Ω. ثم عوِّض القيم: $I = 100/10{,}000 =$ 0.0100 A.



الشكل (12-8): دارة لحل المسائل المتعلقة بقانون أوم.

حسابات الجهد

إن الاستخدام الثاني لقانون أوم هو إيجاد الجهود المجهولة عندما يكون التيار والمقاومة معروفين. قم في المسائل التالية بإظهار مقياس الأمبير وإخفاء مقياس الجهد في ذهنك.

مسألة (12-3)

افترض أنه جرى ضبط المقاومة المتغيرة (راجع الشكل (12-8)) على 100 Ω، وكان التيار الُمقاس 10.0 mA. ما هي قيمة الجهد dc؟

حل (12-3)

استخدم الصيغة $E = IR$. أولاً، حوِّل التيار إلى أمبير: 10.0 mA = 0.0100 A. ثم نفِّذ عملية الضرب $E = 0.0100 \times 100 = 1.00$ V. وهو جهد منخفض وآمن، وأقل بقليل مما تُنتجه خلية ضوئية صغيرة.

حسابات المقاومة

يمكن استخدام قانون أوم لإيجاد المقاومة بين نقطتين في دارة dc عندما يكون الجهد والتيار معروفين. تصور في المسائل اللاحقة أن كلاً من مقياس الجهد والأمبير في الشكل (12-8) ظاهران، ولكن افترض أن المقاومة المتغيرة غير معيّرة.

مسألة (12-4)

إذا كانت قراءة الجهد 24 V، وأظهر مقياس الأمبير 3.0 A، ما هي قيمة المقاومة المتغيرة؟

حل (12-4)

استـــخدم الـــصيغة $R = E/I$، وقسّم القيم مباشرة لأنه جرى التعبير عنها بالفولت والأمبير: $R = 24/3.0 = 8.0\ \Omega$.

حسابات الاستطاعة

يمكـــنك حـــساب الاســـتطاعة P (بالوات، يُرمز لها W) في دارة dc كالدارة الموضحة في الشكل (12-8) باستخدام الصيغة التالية:

$$P = EI$$

حيث يُمثّل E الجهد مقدراً بالفولت ويمثّل I التيار مقدراً بالأمبير. قد لا تُعطى الجهد مباشرة، ولكن يمكنك حسابه إذا عرفت التيار والمقاومة.

تذكـــر صيغة قانون أوم للحصول على الجهد: $E = IR$. إذا كنت تعلم I وR ولا تعلم E، يمكنك الحصول على الاستطاعة P باستخدام الصيغة:

$$P = (IR)\ I = I^2R$$

أي، بأخـــذ التـــيار مقـــدراً بالأمـــبير، وضرب هذا الرقم بنفسه، ثم ضرب النتيجة بالمقاومة مقدرة بالأوم.

يمكـــنك أيـــضاً الحصول على الاستطاعة إذا لم تُعطَ التيار مباشرة. افترض أنك أُعطيت قيمتي الجهد والمقاومة. تذكر صيغة قانون أوم للحصول على التيار: $I = E/R$. لذلك، يمكنك حساب الاستطاعة باستخدام هذه الصيغة:

$$P = E\ (E/R) = E^2/R$$

أي، بأخذ الجهد، وضربه بنفسه، وتقسيمه على المقاومة.

وإذا أردنا ذكرها كلها، تكون صيغ الاستطاعة

$$P = EI = I^2R = E^2/R$$

نحن الآن جاهزون بشكل كلي لإجراء حسابات الاستطاعة. عُد مرة أخرى إلى الشكل (12-8).

مسألة (12-5)

افتـــرض أن قـــراءة مقياس الجهد 12 V وأظهر مقياس الأمبير 50 mA. ما هي الاستطاعة المبددة بواسطة المقاومة المتغيرة؟

حل (12-5)

اســـتخدم الـــصيغة $P = EI$. أولاً بـــتحويل التـــيار إلى أمـــبير، نحصل على $I = 0.050$ A. ثم $P = EI = 12 \times 0.050 = 0.60$ W.

كيف يجري وصل المقاومات

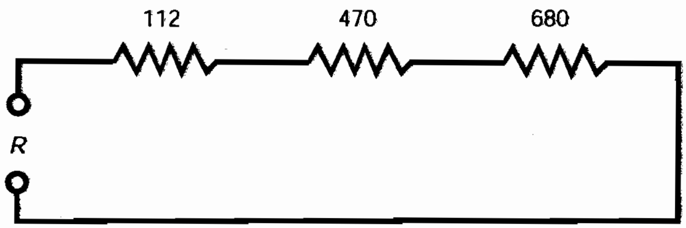
عـــندما تحتوي الأجهزة أو المُكوِّنات الكهربائية التي تعمل بالتيار المستمر على مقاومات موصولة مع بعضها، توصل مقاوماتها وفقاً لقواعد محددة. تكون مقاومة الوصل (المقاومة المكافئة) في بعض الأحيان أكبر من أي من مقاومات الأجهزة أو المُكوِّنات في الدارة. تكون مقاومة الوصل في حالات أخرى أصغر من أي من مقاومات الأجهزة أو المُكوِّنات في الدارة.

المقاومات على التسلسل

عند وصل المقاومات على التسلسل، تُضاف قيم المقاومات الأومية للحصول على المقاومة الكلية. إن ذلك بسيط وبديهي، وسهل التذكر.

مسألة (12-6)

افترض أنه جرى وصل المقاومات التالية على التسلسل مع بعضها 112 أوم، و470 أوم، و680 أوم (الشكل (12-9)). ما هي مقاومة الوصل التسلسلية الكلية؟



الشكل (12-9): مثال لثلاث مقاومات موصولة على التسلسل.

حل (12-6)

بإضافة القيم فقط، تحصل على المقاومة الكلية $112 + 470 + 680 = 1,262\ \Omega$. يمكنك تقريب هـــذا الرقم بالتدوير إلى 1,260 أوم. يعتمد ذلك على سماحيات المُكوِّنات - أي مقدار تغيّر القيم الفعلية الناتجة عن إجرائيات التصنيع، عن القيم المحددة من قبل البائع. إن السماحية مفهوم هندسي أكثر منه مفهوم فيزيائي، وبالتالي لن نقلق بشأن ذلك هنا.

المقاومات على التفرع

عـــند وصـــل المقاومات على التفرع، فإنها تتصرف بشكل مختلف عما تتصرفه في حال وصلها على التسلـــسل. في الحالة العامة، إذا كان لديك مقاومة ذات قيمة محددة ووصلت مقاومات أخرى على التفرع معها، فإن المقاومة الكلية تنقص. رياضياً، القاعدة واضحة، ولكن يمكن أن تكون مربكة.

إن إحدى طرق تقييم المقاومات على التفرع هي اعتبارها *ناقليات* بدلاً من اعتبارها مقاومات. تقاس الناقلية بوحدة تدعى *السيمينـــز*، ويُرمز لها في بعض الأحيان S. استخدمت في المستندات القديمة الكلمة مو

(mho) (تلفظ ohm بشكل عكسي) بدلاً من سيمينز. تُضاف الناقليات على التفرع بالطريقة نفسها التي تضاف بها المقاومات على التسلسل. إذا غيرت جميع القيم الأومية إلى سيمينز، يمكنك إضافة هذه الأعداد وتحويل الجواب النهائي إلى أوم بشكل عكسي.

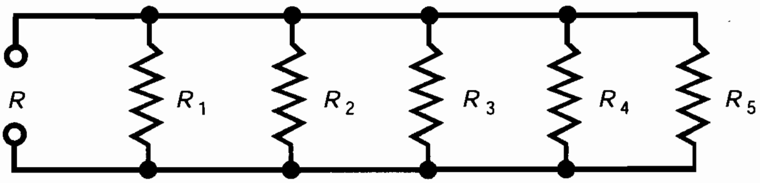
إن رمز الناقلية هو G. الناقلية بالسيمينز هي مقلوب المقاومة بالأوم. يمكن التعبير عن ذلك بشكل دقيق في الصيغتين التاليتين. على افتراض أن أياً من R أو G لا تساوي الصفر:

$$G = 1/R$$

$$R = 1/G$$

مسألة (12-7)

خذ بالاعتبار خمس مقاومات موصولة على التفرع. سمِّها R_1 إلى R_5، وسمِّ المقاومة الكلية R، كما هو موضح في المخطط في الشكل (12-10). لتكن $R_1 = 100\ \Omega$، و$R_2 = 200\ \Omega$، و $R_3 = 300\ \Omega$، و$R_4 = 400\ \Omega$، و$R_5 = 500\ \Omega$، على التوالي. ما هي المقاومة الكلية لهذه المقاومات الموصولة على التفرع؟



الشكل (12-10): خمس مقاومات عامة على التوازي.

حل (12-7)

بتحويل المقاومات إلى سماحيات، تحصل على $G_1 = 1/100 = 0.0100$ S، و $G_2 = 1/200 = 0.00500$ S، و$G_3 = 1/300 = 0.00333$ S، و$G_4 = 1/400 = 0.00250$ S، و $G_5 = 1/500 = 0.00200$ S. وبجمع القيم السابقة نحصل على $G = 0.0100 + 0.00500 + 0.00333 + 0.00250 + 0.00200 = 0.02283$ S. وبالتالي تكون المقاومة الكلية $R = 1/G = 1/0.02283 = 43.80\ \Omega$. وبما أننا أُعطينا قيم الدخل بثلاثة أرقام هامة، يجب تقريب الجواب بالتدوير إلى $43.8\ \Omega$.

عندما يكون لديك مقاومات موصولة على التفرع وجميع قيمها متساوية، فالمقاومة الكلية تساوي إلى مقاومة أي من المُكوِّنات مقسومة على عدد المُكوِّنات. بالمعنى الأكثر عمومية، تكون المقاومة الكلية للمقاومات في الشكل (12-10) مساوية:

$$R = 1/(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4 + 1/R_5)$$

إذا كنت تُفضِّل استخدام الأسس، ستبدو الصيغة على الشكل:

$$R = (R_1^{-1} + R_2^{-1} + R_3^{-1} + R_4^{-1} + R_5^{-1})^{-1}$$

إن العمل بصيغة هذه المقاومة مزعج لبعض الأشخاص، ولكنها تُمثّل رياضياً ما قمنا به في المسألة (12-7).

التيار في المقاومات التسلسلية

هل استخدمت مصابيح العيد الصغيرة جداً التي تأتي على شكل سلاسل؟ إذا احترق أحد المصابيح، ستنطفئ المجموعة بكاملها. ثم عليك اكتشاف المصباح السيئ واستبداله لتعمل المصابيح مرة ثانية. يعمل كل مصباح بجهد يقارب 10 V، ويوجد حوالى دزينة مصابيح في السلسلة. تقوم بتوصيل المجموعة كاملة، وتُزوِّد شبكة الكهرباء الرئيسية 120 - V كل مصباح بالكمية الصحيحة من التيار.

في الدارة التسلسلية كدارة سلسلة المصابيح، يكون التيار في أي نقطة معطاة نفسه في أي نقطة أخرى. يمكن وصل مقياس الأميتر على التسلسل في نقطة ما من الدارة، وسيُظهر دائماً القراءة نفسها. يُعتبر ذلك صحيحاً في أي دارة dc تسلسلية، أياً تكن المُكوِّنات الفعلية للدارة وبغض النظر عن امتلاكها أو عدم امتلاكها للمقاومة نفسها.

إذا كانت مقاومات مصابيح السلسلة مختلفة، ستستهلك بعض المصابيح قدرة أكثر من المصابيح الأخرى. في حالة احتراق أحد المصابيح وقصر مغرزها بدلاً من استبداله بمصباح، سيزداد التيار في كامل السلسلة بسبب المقاومة الكلية للسلسلة. سيجبر ذلك المصابيح المتبقية على تحمل تيار كبير جداً. سيحترق لاحقاً مصباح آخر كنتيجة لهذا التيار الزائد. إذا استبدلنا المصباح المحترق بدارة مقصورة أيضاً، سيزداد التيار أكثر. سينطفئ مصباح آخر على الأغلب. سيكون من الحكمة في هذه المرحلة شراء بعض المصابيح الجديدة!

الجهود على المقاومات التسلسلية

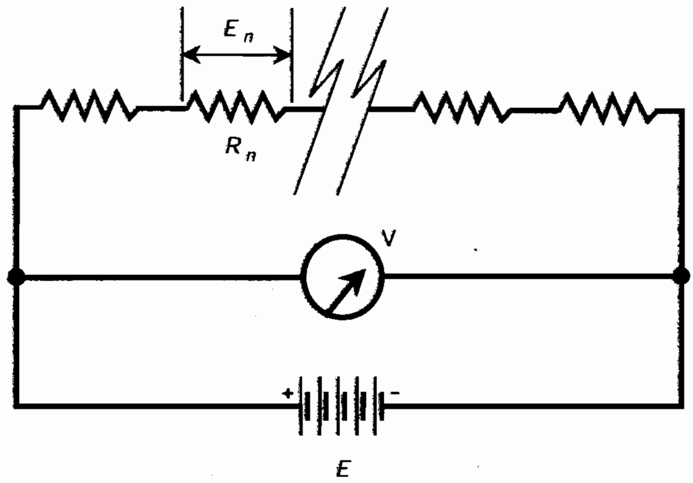
يُقسَّم الجهد في الدارات التسلسلية على المُكوِّنات. المجموع الكلي لفروق الكمون على كل مقاومة يساوي إلى جهد البطارية أو مُزوِّد الجهد dc. إن ذلك صحيح دائماً ولا مشكلة بكبر أو صغر المقاومات وهل لها أو ليس لها القيمة نفسها.

إذا فكرت بذلك للحظة، فمن السهل رؤية أن ذلك صحيح. انظر إلى المخطط التخطيطي في الشكل (12-11). يمر في كل مقاومة التيار نفسه. يُطبّق على كل مقاومة R_n فرق كمون E_n ويساوي إلى حاصل ضرب التيار بقيمة تلك المقاومة الخاصة. يُماثل الجهد E_n هذا خلايا البطارية الموصولة تسلسلياً، لذا فهي تُجمع مع بعضها. ماذا لو كان مجموع قيم E_n عبر المقاومات أكبر أو أصغر من مُزوِّد الجهد E؟ عندها سيكون في مكان ما ”emf خيالية“، مضافة أو مأخوذة من الجهد. ولكن، لن يكون هناك شيء كهذا. لا يمكن أن تنشأ emf من العدم.

انظر لذلك بطريقة أخرى. يوضح مقياس الفولت V في الشكل (12-11) جهد البطارية E لأنه جرى وصل المقياس على طرفي البطارية. يُظهر مقياس V أيضاً وببساطة مجموع قيم E_n المطبقة على مجموعة من

المقاومات لأن المقياس موصول عبر مجموعة من المقاومات. يُظهِر المقياس الشيء نفسه إذا كنت تفكر بقياس جهد البطارية E أو بقياس مجموع قيم E_n عبر الوصل التسلسلي للمقاومات. لذلك، تساوي E إلى مجموع قيم E_n.

إنها قاعدة أساسية في دارات dc التسلسلية. وتُطبَّق هذه القاعدة أيضاً على دارات ac المتعلقة بالمرافق العامة دائماً تقريباً.



الشكل (12–11): تحليل الجهد في دارة *dc* تسلسلية. راجع المناقشة الواردة في النص.

كيف تجد الجهد المُطبّق على أي مقاومة خاصة R_n في دارة كالدارة الموضحة في الشكل (12–11)؟ تذكر قانون أوم لإيجاد الجهد: $E = IR$. الجهد يساوي إلى حاصل ضرب التيار بالمقاومة. تذكر أيضاً أنه عند إجراء الحسابات، يجب عليك استخدام الفولت، والأوم، والأمبير. بهدف إيجاد التيار I في الدارة، تحتاج لمعرفة المقاومة الكلية ومُزوِّد الجهد. إذاً $I = E/R$. جِدْ أولاً التيار في كامل الدارة؛ ثم جِدْ الجهد المُطبق على أي مقاومة معينة.

مسألة (12–8)

افترض أنه يوجد في الشكل (12–11) 10 مقاومات. خمس من هذه المقاومات قيمها 10 أوم، والمقاومات الخمس المتبقية قيمها 20 أوم. قيمة مُزوِّد الجهد 15 V dc. ما هو الجهد على طرفي كل مقاومة من المقاومات ذات القيمة 10 أوم؟ وعبر كل مقاومة من المقاومات ذات القيمة 20 أوم؟

حل (12–8)

أولاً، جِدْ المقاومة الكلية: $R = (10 \times 5) + (20 \times 5) = 50 + 100 = 150\ \Omega$. ثم جِدْ التيار: $I = E/R = 15/150 = 0.10\ A$. إنه التيار المار في كل مقاومة في الدارة. إذا كانت $R_n = 10\ \Omega$، إذاً

$$E_n = I\,(R_n) = 0.10 \times 10 = 1.0\ V$$

إذا كانت $R_n = 20\ \Omega$، بالتالي

$$E_n = I\,(R_n) = 0.10 \times 20 = 2.0\ \text{V}$$

يمكـــن إجـــراء الاختـــبار لترى إذا كان مجموع هذه الجهود يساوي جهد مُزوِّد الجهد. يوجد 5 مقاومات بحيث يكون جهد كل منها 1.0 V، ومجموع جهودها 5.0 V؛ يوجد أيضاً 5 مقاومات جهـــد كل منها 2.0 V، ومجموع جهودها 10 V. بالنتيجة مجموع جهود المقاومات العشرة هو 5.0 V + 10 V = 15 V.

الجهود على المقاومات التفرعية

تخـــيّل الآن مجموعة من مصابيح الزينة الضوئية الموصولة على التفرع. إنها الطريقة المستخدمة للإنارة الخارجية أو للإنارة الداخلية الساطعة. تعلم أن إصلاح مصباح محترق في سلسلة من المصابيح الموصولة على التفـــرع أكثـــر سهولة من إصلاح مصباح محترق في سلسلة موصولة على التسلسل. لن يسبب تعطل أحد المـــصابيح إخفاقاً كارثياً للنظام. في الحقيقة، ربما ستنتظر لبرهة قبل أن تلاحظ أن المصباح مطفأ لأن جميع المصابيح الأخرى مضيئة، وسطوعها لا يتغير.

يكـــون الجهـــد في الدارة التفرعية، على كل مُكوِّن دائماً نفسه ويساوي دائماً جهد المُزوِّد أو جهد الـــبطارية. يعتمد التيار المُستجَر من كل عنصر على المقاومة الخاصة بذلك الجهاز فقط. بهذا المعنى، تعمل المُكـــوِّنات في الـــدارة الموصـــولة تفرعياً بشكل مستقل، بشكل معاكس للدارة الموصولة تسلسلياً، حيث يتداخل عمل هذه المُكوِّنات.

إذا تعطل أي فرع من فروع الدارة التفرعية، تبقى الشروط في الفروع الأخرى نفسها. إذا أُضيفت فروع جديدة، مع افتراض أن مُزوِّد الجهد قادر على معالجة الحمل، لا تتأثر الشروط في الفروع الموجودة مسبقاً.

التيارات المارة في المقاومات التفرعية

عُـــد إلى المخطـــط التخطيطـــي في الـــشكل (12–12). المقاومة التفرعية الكلية في الدارة هي R. جهـــد الـــبطارية هـــو E. ويُقـــاس التيار في الفرع n، الذي يحتوي على المقاومة R_n، بمقياس الأمبير A ويدعى I_n.

إن مجموع جميع قيم I_n في الدارة يساوي التيار الكلي I المُستجَر من المُزوِّد. أي يُقسَّم التيار في الدارة التفرعية، بشكل مشابه للطريقة التي جرى بها تقسيم الجهد في الدارة التسلسلية.

مسألة (12–9)

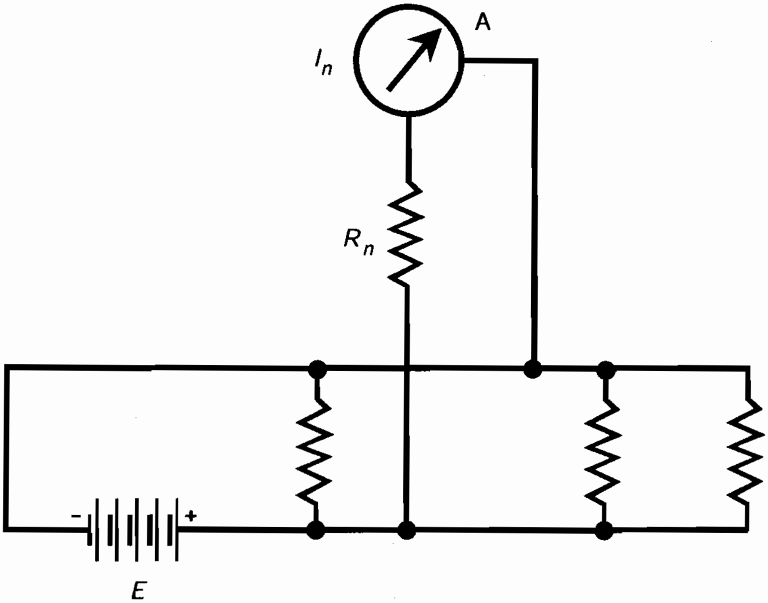
افترض أن البطارية في الشكل (12–12) تُزوِّد بجهد قيمته 12 V. افترض أيضاً أنه يوجد في الدارة التفرعية 12 مقاومة، قيمة كل منها 120 أوم. ما هو التيار الكلي المُستجَر من البطارية؟

حل (12–9)

أولاً، جدْ المقاومة الكلية. إن ذلك سهل لأن لجميع المقاومات القيمة نفسها. قسِّم $R_n = 120$ على

12 لتحصل على $R = 10$ أوم. وبالتالي نجد التيار I باستخدام قانون أوم:

$$I = E/R = 12/10 = 1.2 \text{ A}$$



الشكل (12-12): تحليل الجريان على التوازي في الدارة *dc*.

مسألة (12-10)

إلامَ سيشير مقياس الأمبير في الدارة في الشكل (12-12)، إذا كانت قيم المُكوِّنات نفسها القيم الواردة في سيناريو المسألة السابقة؟

حل (12-10)

يستلزم ذلك إيجاد التيار في أي فرع معطى. الجهد عبر كل فرع هو 12 فولت؛ $R_n = 120$. بالنتيجة يجري إيجاد I_n وهي قراءة مقياس الأمبير بواسطة قانون أوم:

$$I_n = E/R_n = 12/120 = 0.10 \text{ A}$$

دعنا نتحقق لنتأكد من أنه بجمع جميع قيم I_n نحصل على التيار الكلي I. يوجد 12 فرعاً متطابقاً، يمر في كل فرع 0.10 A؛ بالنتيجة، يكون المجموع $0.10 \times 12 = 1.2$ A. والنتيجة محققة.

توزع الاستطاعة في الدارات التسلسلية

دعنا نعد الآن إلى الدارات التسلسلية. عند حساب الاستطاعة في دارة تحوي مقاومات على التسلسل، كل ما تحتاجه هو اكتشاف التيار I، المار في الدارة مقدراً بالأمبير. بالنتيجة من السهل حساب الاستطاعة P_n، مقدرة بالوات، وهي الاستطاعة المبددة بواسطة أي مقاومة قيمتها R_n، بالأوم اعتماداً على الصيغة $P_n = I^2R_n$.

تـــساوي الاستطاعة الكلية المبددة في دارة تسلسلية إلى مجموع الواطية المبددة في كل مقاومة. يشبه توزع الاستطاعة في دارة تسلسلية بهذه الطريقة توزع الجهد.

مسألة (12–11)

افترض أنه لدينا دارة تسلسلية بمُزوِّد V 150 وثلاث مقاومات: $R_1 = 330\ \Omega$، و$R_2 = 680\ \Omega$، و $R_3 = 910\ \Omega$. ما هي الاستطاعة المبددة بواسطة R_2؟

حل (12–11)

جدْ التيار المار في الدارة. للقيام بذلك، احسب أولاً المقاومة الكلية. بما أن المقاومات موصولة على التسلسل، فإن المقاومة الكلية هي $R = 330 + 680 + 910 = 1920\ \Omega$. بالنتيجة يكون التيار $I = 150/1920 = 0.07813\ A = 78.1\ mA$. وتكون الاستطاعة المبددة بواسطة R_2

$$P_2 = I^2R_2 = 0.07813 \times 0.07813 \times 680 = 4.151\ W$$

يجب تقريب هذا العدد بالتدوير إلى ثلاثة أرقام هامة، لنحصل على W 4.15.

توزع الاستطاعة في الدارات التفرعية

عـــند وصل المقاومات على التفرع، يستهلك كل منها استطاعة وفقاً للصيغة نفسها، أي $P = I^2R$. ولكـــن، لا يكـــون التيار نفسه في كل مقاومة. إن الطريقة الأبسط لإيجاد الاستطاعة P_n المبددة بواسطة مقاومـــة قيمـــتها R_n هي باستخدام الصيغة $P_n = E^2/R_n$، حيث إن E هو جهد المُزوِّد. يكون جهد كل مقاومة هو جهد المُزوِّد نفسه.

تساوي الاستطاعة الكلية المستهلكة في دارة تفرعية إلى مجموع الواطية المبددة بواسطة المقاومات كل على حدة. وذلك صحيح في الحقيقة بالنسبة لأي دارة dc تحتوي على مقاومات. الطاقة لا تفنى ولا تنشأ من العدم.

مسألة (12–12)

تحتوي دارة على ثلاث مقاومات $R_1 = 22\ \Omega$، و$R_2 = 47\ \Omega$، و$R_3 = 68\ \Omega$، جميعها موصولة على التفرع عبر جهد $E = 3.0\ V$. جدْ الاستطاعة المبددة بواسطة كل مقاومة.

حل (12–12)

جدْ أولاً E^2، مربع جهد المُزوِّد: $E^2 = 3.0 \times 3.0 = 9.0$، وبالتالي $P_1 = 9.0/22 = 0.4091\ W$، و$P_2 = 9.0/47 = 0.1915\ W$، و$P_3 = 9.0/68 = 0.1324\ W$، ويجـــب تقـــريب هـــذه الأجوبة بالتدوير إلى $P_1 = 0.41\ W$، و$P_2 = 0.19\ W$، و$P_3 = 0.13\ W$ على التوالي.

قوانين كيرشوف

كـــان الفيزيائـــي غوستاف روبيرت كيرشوف (1824–1887) باحثاً ومجرباً في الكهرباء، قبل زمن الراديو، وقبل الإنارة الكهربائية، وقبل فهم كيفية تدفق التيارات الكهربائية.

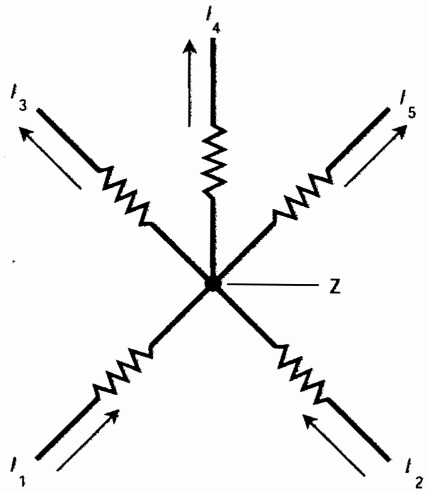
قانون كيرشوف في التيار

فكر كيرشوف بأن التيار يجب أن يعمل بشكل مشابه للماء في شبكة من الأنابيب، ويجب أن تكون التيارات الواردة إلى نقطة ما هي نفسها التيارات الصادرة عنها. وهذا صحيح بالنسبة لأي نقطة في الدارة، ولا مشكلة في عدد الفروع الواردة أو الصادرة عن النقطة (الشكل (12–13).

في شـبكة أنابيب مياه لا يوجد فيها تسرب ولا يُضاف لها أي كمية من الماء، يجب أن يكون العدد الكلي للأمتار المكعبة الواردة مساوياً للعدد الكلي الصادر. لا يمكن أن يتشكل الماء من اللاشيء، ولا يمكن أن يختفـي، داخل نظام مغلق من الأنابيب. فكر كيرشوف بأنه يجب أن تتصرف حوامل الشحنة في الدارة لكهربائية بالطريقة نفسها.

مسألة (12–13)

في الشكل (12–13)، افترض أن قيمة كل من المقاومتين الواقعتين أسفل النقطة Z تساوي 100 أوم وأن قيم المقاومات الثلاث أعلى النقطة Z هي 10.0 أوم. التيار المار في كل مقاومة قيمتها 100 أوم يساوي 500 mA (0.500 A). ما هو التيار المار في أي من المقاومات 10.0 أوم، على افتراض أن التيار موزع بالتساوي؟ وما هو الجهد إذاً على أي من المقاومات 10.0 أوم؟



الشكل (12–13): قانون كيرشوف في التيار. التيار الداخل إلى النقطة Z يساوي إلى التيار الخارج من النقطة Z. في هذه الحالة، $I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5$.

حل (12–13)

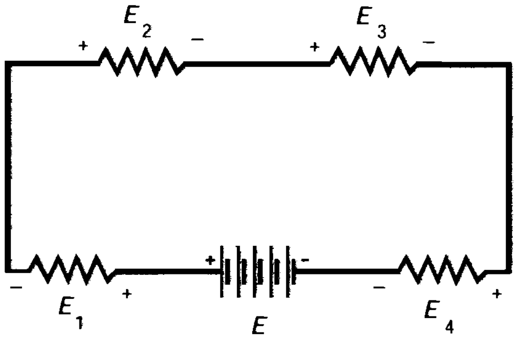
إن التـيار الكلـي الـوارد إلى Z يـساوي $500\ mA + 500\ mA = 1.00\ A$. ويجب أن ينقسم بالتـساوي علـى ثلاثـة مـسارات للمقاومـات 10 أوم. لذلك يكون التيار في أي من هذه المقاومات $1.00/3\ A = 0.333\ A = 333\ mA$. يجـري إيجاد الجهد عبر أي من المقاومات 10.0 أوم بواسطة قانون أوم: $E = IR = 0.333 \times 10.0 = 3.33\ V$.

قانون كيرشوف في الجهد

يكون مجموع الجهود عند الانتقال في دارة من نقطة ثابتة ما والعودة لهذه النقطة من الجهة المعاكسة، وبأخذ القطبية بالحسبان، دائماً صفراً. يجد بعض القراء هذا الأمر غريباً للوهلة الأولى. يوجد بالتأكيد جهد في مجفف الشعر الكهربائي أو الراديو أو الكمبيوتر! نعم، يوجد جهد بين النقاط المختلفة في الدارة. ولكن، لا يمكـــن أن يكـــون لنقطة ما كمون كهربائي بالنسبة لنفسها. إن ذلك بسيط جداً بل إنه بديهي. تكون النقطة في الدارة مقصورة على نفسها دائماً.

ما قاله كيرشوف عندما كتب قانونه في الجهد هو أنه لا يمكن أن يفنى الجهد أو ينشأ من العدم. يجب أن تكون جميع فروق الكمون متوازنة في أي دارة، أياً تكن الدارة معقدة وأياً يكن عدد الفروع الموجودة.

خـــذ بالاعتـــبار القاعـــدة التي تعلمتها مسبقاً عن الدارات التسلسلية: تجمع جهود جميع المقاومات للحـــصول علـــى جهد المُزوِّد. ولكن، تكون قطبية قوى emf عبر المقاومات معاكسة لقطبية البطارية. إن ذلـــك موضـــح في الشكل (12-14). إنه أمر دقيق، ولكنه يصبح واضحاً عند رسم دارة تسلسلية بجميع مُكوِّناتها، متضمنة البطارية أو مُزوِّد emf آخر بجوار بعضهم البعض، كما في الشكل (12-14).



الشكل (12-14): قانون كيرشوف في الجهد. مجموع الجهود $E + E1 + E2 + E3 + E4 = 0$ وذلك بأخذ القطبية بالحسبان.

مسألة (12-14)

عُد إلى المخطط في الشكل (12-14). افترض أن قيم المقاومات الأربع هي 50، و60، و70، و80 أوم، وأن التيار المار فيها هو 500 mA (0.500 A). ما هو جهد المُزوِّد E؟

حل (12-14)

جـــدْ الجهود E_1، وE_2، وE_3، وE_4، على كل من المقاومات. يجري ذلك باستخدام قانون أوم. في حالـــة E_1، حيث تساوي المقاومة 50 أوم، ويكون $E_1 = 0.500 \times 50 = 25$ V. يمكننا بالطريقة نفسها حساب $E_2 = 30$ V، و$E_3 = 35$ V، و$E_4 = 40$ V ويكون جهد المُزوِّد $E_1 + E_2 + E_3 + E_4 = 25 + 30 + 35 + 40$ V $= 130$ V.

امتحان موجز

عــــد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. افتــــرض أنه يتدفق 5.00×10^{17} من حوامل الشحنة الكهربائية عبر نقطة بزمن قدره 1.00 s. ما هو الجهد الكهربائي؟

(a) 0.080 V

(b) 12.5 V

(c) 5.00 V

(d) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

2. يمكن أيضاً اعتبار الأمبير على أنه

(a) أوم بالفولت.

(b) أوم بالوات.

(c) فولت بالأوم.

(d) فولت-أوم.

3. افتــــرض وجود مقاومتين في دارة تسلسلية. قيمة إحدى المقاومتين 33 kΩ (أي 33,000 أو 3.3×10^4 أوم). قيمة المقاومة الأخرى مجهولة. الاستطاعة المبددة بواسطة المقاومة 33 kΩ تساوي 3.3W. ما هو التيار المار في المقاومة المجهولة؟

(a) 0.11 A

(b) 10 mA

(c) 0.33 mA

(d) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

4. إذا كان الجهد عبر مقاومة E (بالفولت) والتيار المار في المقاومة I (بالميلي أمبير)، إذاً تُعطى الاستطاعة P (بالوات) بواسطة الصيغة التالية:

(a) $P = EI$.

(b) $P = EI \times 10^3$.

(c) $P = EI \times 10^{-3}$.

(d) $P = E/I$.

5. افترض أنه لديك مجموعة مُكوَّنة من خمسة مصابيح ضوئية ومضية موصولة على التفرع عبر مُزوِّد dc قيمته 3.0 V. إذا احترق أحد المصابيح أو تم نزعه، ماذا سيحدث للتيار المار في المصابيح الأربعة المتبقية؟

(a) سيبقى نفسه.

(b) سيزداد.

(c) سينقص.

(d) سينخفض إلى الصفر.

6. يُميِّز العازل الكهربائي الجيد.

(a) بناقليته الممتازة.

(b) بناقليته المعقولة.

(c) بناقليته الضعيفة.

(d) بناقليته المتغيرة.

7. افترض وجود مقاومتين في دارة تفرعية. قيمة إحدى المقاومتين 100 أوم. وقيمة المقاومة الأخرى مجهولة. والاستطاعة المبددة بواسطة المقاومة 100- أوم تساوي 500 mW (أي 0.500 W). ما هو التيار المار في المقاومة المجهولة؟

(a) 71 mA

(b) 25 A

(c) 200 A

(d) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

8. يتدفق التيار الاصطلاحي

(a) من القطب الموجب إلى القطب السالب.

(b) من القطب السالب إلى القطب الموجب.

(c) في أي اتجاه، لا يهم.

(d) لا مكان؛ التيار لا يتدفق.

9. افترض أن دارة تحوي مقاومة 620 أوم وأن التيار المار في هذه الدارة 50.0 mA. ما هو جهد هذه المقاومة؟

(a) 12.4 kV

(b) 31.0 V

(c) 8.06×10^{-5} V

(d) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

10. أي من التالي لا يمكن اعتباره حامل شحنة كهربائية؟

(a) النيترون.

(b) الإلكترون.

(c) الثقب.

(d) الأيون.

الفصل 13

التيار المتناوب

يمكـــن التعبير عن التيار المستمر بدلالة متحولين: *القطبية* (أو الاتجاه) *والسعة*. إن التيار المتناوب (ac) أكثـــر تعقـــيداً من التيار المستمر. حيث يوجد متحولات إضافية: وهي الدور (ومقلوبه، *التردد*)، *والشكل الموجي*، *والطور*.

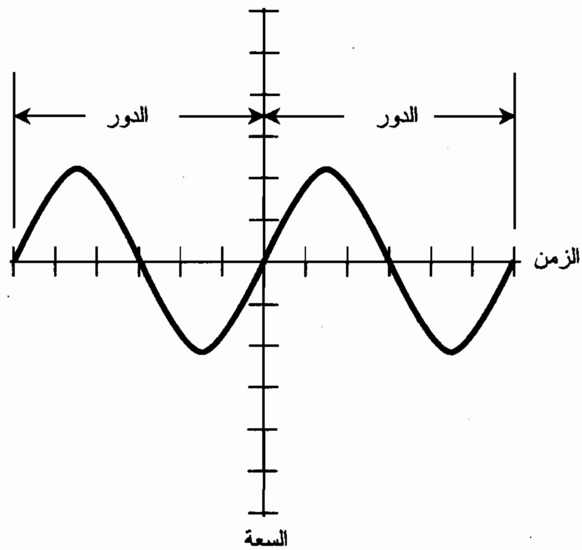
تعريف التيار المتناوب

التـــيار المتـــناوب هو تيار له اتجاه أو قطبية، تبقى نفسها خلال مدة طويلة من الزمن. تتدفق حوامل الـــشحنة دائمـــاً بالاتجاه نفسه في الدارة بالرغم من إمكانية تغيّر السعة؛ إمكانية تقلب عدد الأمبيرات أو الفولتات أو الواتات. تنعكس القطبية في ac بشكل متكرر.

الدور

يتكـــرر الـــتابع الرياضي للسعة بدلالة الزمن في موجة *ac الدورية*، وهذا النوع من الأمواج هو ما سنناقـــشه في هـــذا الفصل، بشكل دقيق ولا نهائي؛ أي يتكرر النموذج نفسه بشكل لا نهائي. الدور هو الطـــول الزمني بين تكرار واحد للنموذج أو لدورة واحدة للموجة، والنموذج اللاحق أو الدورة اللاحقة. يوضح الشكل (13-1) دور موجة ac بسيطة.

يمكن أن يتراوح دور الموجة نظرياً بين جزء صغير من الثانية وعدة قرون. تُقاس أدوار بعض الحقول المغنطيـــسية (EM) بجـــزء مـــن كادرليون جزء من الثانية أو أقل. يقوم الحقل المغنطيسي الذي يأسر هذه الجُـــسيْمات المشحونة بعكس اتجاه هذه الجُسيْمات خلال أدوار تُقاس بالسنوات. يُرمز للدور، عند قياسه بالثواني، بالرمز T.



الشكل (13-1): موجة جيبية. الدور هو الطول الزمني اللازم لإكمال دورة واحدة.

التردد

إن تردد الموجة الذي يُرمز له f هو مقلوب الدور. أي $f = 1/T$، و$T = 1/f$. جرى تحديد التردد سابقاً (قبل 1970)، *بعدد الدورات بالثانية*، واختصاراً *cps*. وجرى التعبير عن الترددات العالية *بالكيلو دورة* أو *مـــيغا دورة* أو *جيغا دورة*، لتُمثّل آلاف أو ملايين أو بلايين الدورات بالثانية. هذه الأيام، تُعرف الوحدة القياسية للتردد بالهرتز، واختصاراً *Hz*. وبالتالي 1 Hz = 1 cps، و10 Hz = 10 cps، وهكذا.

تُعطـــى الترددات الأعلى *بالكيلو هرتز* (kHz)، *والميغا هرتز* (MHz)، *والجيغا هرتز* (GHz)، *والتيرا هرتز* (THz). والعلاقات هي

$$1 \text{ kHz} = 1{,}000 \text{ Hz} = 10^3 \text{ Hz}$$

$$1 \text{ MHz} = 1{,}000 \text{ kHz} = 10^6 \text{ Hz}$$

$$1 \text{ GHz} = 1{,}000 \text{ MHz} = 10^9 \text{ Hz}$$

$$1 \text{ THz} = 1{,}000 \text{ GHz} = 10^{12} \text{ Hz}$$

مسألة (13-1)

يبلغ دور موجة جيبية 5.000×10^{-6} s. ما هو التردد بالهرتز؟ بالكيلو هرتز؟ بالميغا هرتز؟

حل (13-1)

أولاً، جِدْ التردد f_{Hz} مُقدَّراً بالهرتز وذلك بأخذ مقلوب الدور مُقدراً بالثواني:

$$f_{\text{Hz}} = 1/(5.000 \times 10^{-6}) = 2.000 \times 10^5 \text{ Hz}$$

ثم قسِّم f_{Hz} على 1,000 أو 10^3 للحصول على التردد f_{kHz} أو على التردد مُقدَّراً بالكيلو هرتز:

$$f_{kHz} = f_{Hz}/10^3 = 2.000 \times 10^5/10^3 = 200.0 \text{ kHz}$$

قسِّم أخيراً f_{kHz} على 1,000 أو 10^3 للحصول على التردد f_{MHz} مُقدَّراً بالميغا هرتز:

$$f_{MHz} = f_{kHz}/10^3 = 200.0/10^3 = 0.2000 \text{ MHz}$$

الأشكال الموجية

إذا رسمت الجهد أو التيار اللحظي كتابع للزمن في نظام ac، ستحصل على شكل موجي. يمكن أن تظهر التيارات المتناوبة بأشكال موجية متنوعة ولا نهائية. وهذه أبسط الأشكال الموجية.

الموجة الجيبية

للتيار المتناوب بشكله الأفقي الصرف طبيعة جيبية أو موجة جيبية. الشكل الموجي الموضح في الشكل (13-1) هو موجة جيبية. أي موجة ac لها تردد واحد تكون على شكل موجة جيبية كاملة. وتحتوي أي موجة تيار جيبية كاملة على مُكوِّن ترددي ومُكوِّن ترددي واحد فقط.

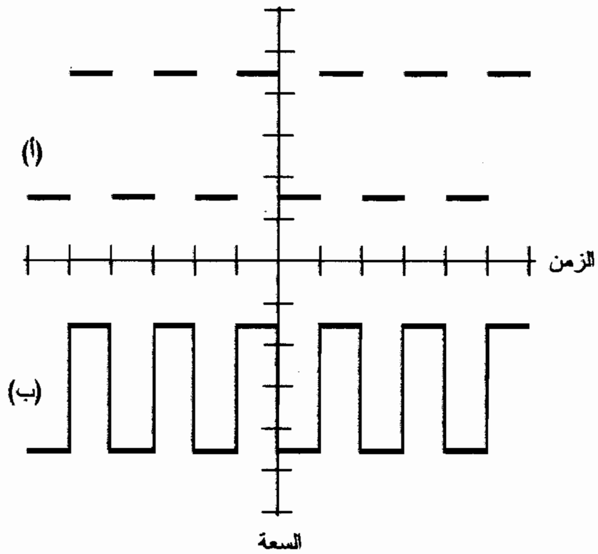
عملياً، قد تكون الموجة قريبة من الموجة الجيبية بحيث تبدو على راسم الاهتزاز وكأنها تابع جيبي تماماً بينما توجد في الحقيقة آثار لترددات أخرى. يكون عدم الكمال الذي نراه عادةً صغيراً جداً. تُزوِّد شبكة ac الرئيسية في الولايات المتحدة بتيار ذي موجة جيبية كاملة تقريباً، بتردد 60 Hz. ولكن يوجد انحرافات خفيفة.

الموجة المربعة

ستبدو *الموجة المربعة* الكاملة نظرياً على راسم الاهتزاز كزوج من الخطوط المُنقَّطة المتوازية، وتكون قطبية أحد الخطوط موجبة وقطبية الخط الآخر سالبة (الشكل (13-2-أ)). يمكن في الحياة الحقيقية عادةً رؤية الانتقالات كخطوط *عامودية* (انظر للشكل (13-2-ب)).

قد يكون للموجة المربعة قمم موجبة وقمم سالبة متساوية. وبالتالي تكون السعة المطلقة للموجة ثابتة لمستوى استطاعة أو تيار أو جهد معين. تكون السعة لمدة نصف الزمن مساوية x+ ولنصف الزمن الآخر مساوية x- فولت أو أمبير أو وات.

تكون بعض الموجات المربعة غير متناظرة، حيث تكون طويلة القمم الموجبة والقمم السالبة مختلفة. إذا كانت الفترة الزمنية التي تكون الطويلة فيها موجبة تختلف عن الفترة الزمنية التي تكون الطويلة فيها سالبة، فإن الموجة ليست موجة مربعة حقيقية ولكن توصف بالمصطلح الأكثر عمومية أي *الموجة المستطيلة*.



الشكل (13-2): (أ) موجة مربعة كاملة نظرياً. (ب) الإظهار الأكثر شيوعاً.

أمواج سن المنشار

تنعكس قطبية بعض أمواج ac بمعدلات ثابتة ولكن غير لحظية. يُشير ميل مستقيم السعة بدلالة الزمن لمدى سرعة تغيّر الطويلة. تُدعى هذه الأمواج *بأمواج سن المنشار* بسبب مظهرها.

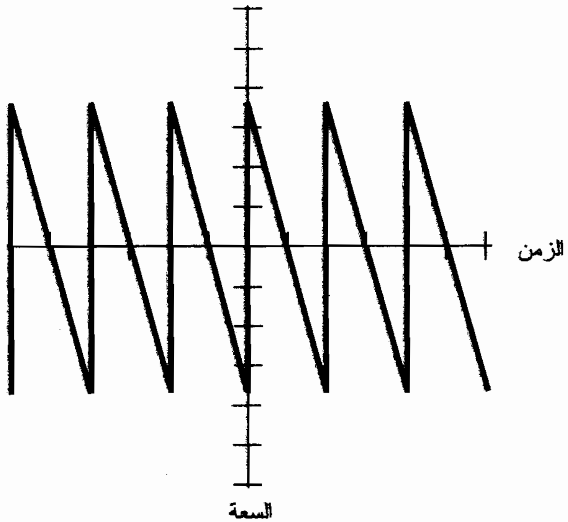
يوضـــح الـــشكل (13-3) شكلاً واحداً لموجة سن المنشار. إن الانتقال ذا الميل الموجب (الصعود) شديد الانحدار جداً، كما في الموجة المربعة، ولكنّ الانتقال ذا الميل السالب (الهبوط أو الانحدار) متدرج. إن دور الموجة هو الزمن بين نقطتين في موضعين متطابقين على نبضتين متتاليتين.

الـــشكل الآخر لموجة سن المنشار هو شكل معاكس للشكل السابق، بميل تدريجي للانتقال الموجب ومـــيل عامودي للانتقال السالب. يُدعى هذا النمط من الأمواج في بعض الأحيان *بالموجة الخطية* (ramp) (الشكل (13-4)). يُستخدم هذا الشكل الموجي للمسح في *أنبوب الأشعة المهبطية* (CRT) في مجموعات التلفاز وراسم الاهتزاز.

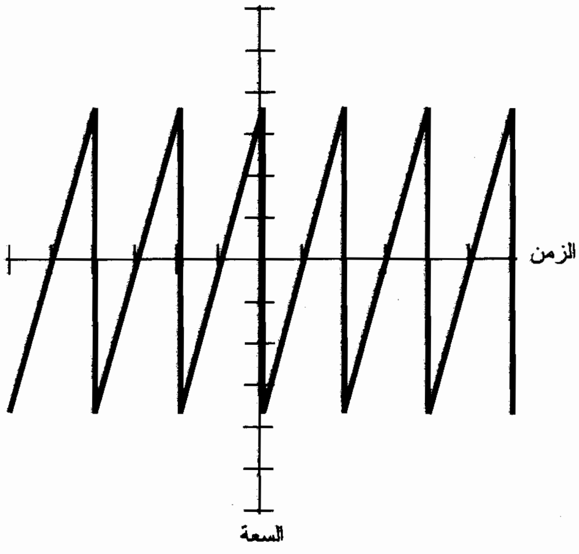
يمكن أن يأخذ ميل الصعود والانحدار لأمواج سن المنشار عدداً لا نهائياً من الأشكال المختلفة. يوضح الـــشكل (13-5) أحد هذه الأمثلة. إن الانتقال ذا الميل الموجب في هذه الحالة هو نفسه الانتقال ذو الميل السالب. إنها *موجة مثلثية*.

مسألة (13-2)

افتـــرض أن كل تدريجة أفقية في الشكل (13-5) تُمثّل 1.0 مايكرو ثانية (1.0μs أو 1.0×10^{-6} s). ما هو دور الموجة المثلثية؟ ما هو ترددها؟



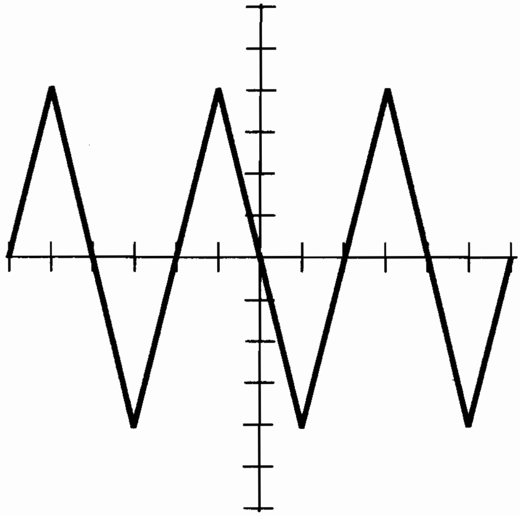
الشكل (13-3): موجة سن منشار بصعود سريع وهبوط بطيء.



الشكل (13-4): موجة سن منشار بصعود بطيء وانحدار سريع، وتُدعى أيضاً موجة *ramp*.

حل (13-2)

إن الطريقة الأسهل لمعاينة ذلك هي بتقييم الموجة من النقطة التي تتقاطع بها مع محور الزمن أثناء الصعود ثم إيجاد النقطة التالية (إلى اليمين أو إلى اليسار) التي تتقاطع بها الموجة مع محور الزمن أثناء الصعود. وهي في حالتنا هذه أربع تدريجات أفقية، على الأقل وفق محدودية قدرتنا البصرية. وبالتالي يكون الدور T مساوياً 4.0 μs أو 4.0×10^{-6} s. التردد هو مقلوب الدور: $f = 1/T = 1/(4.0 \times 10^{-6}) = 2.5 \times 10^{5}$ Hz.



الشكل (13-5): موجة مثلثية.

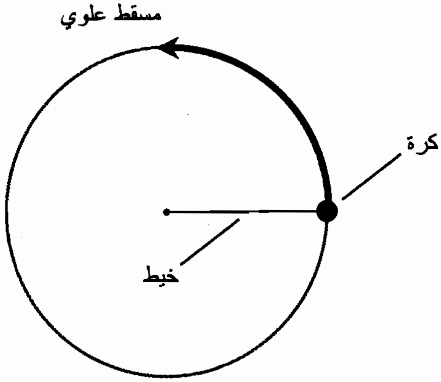
أجزاء الدورة

قسّم العلماء والمهندسون دورة ac إلى أجزاء أصغر للتحليل والمراجعة. يمكن تشبيه الدورة الكاملة بدورة واحدة حول دائرة.

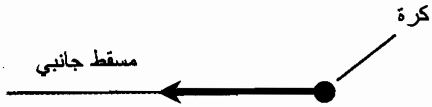
الأمواج الجيبية كحركة دائرية

افترض أنك تُدوِّر خيطاً في نهايته كرة متألقة بشكل دائري بمعدل دورة بالثانية. سترسم الكرة إذاً دائرة في الفضاء (الشكل (13-6-أ)). افترض أنك تُدوِّر الكرة بشكل دائري بحيث تبقى دائماً في المستوى نفسه؛ أي يقع مسارها في مستوى أفقي. تخيل أنك تقوم بذلك في قاعة ألعاب رياضية (جمباز) مظلمة. إذا كان أحد الأصدقاء يقف بعيداً وعيناه أو عيناها في مستوى مسار الكرة، فماذا سيرى صديقك؟ سيرى فقط الكرة المتألقة، تهتز جيئة وذهاباً. تبدو الكرة وكأنها تنتقل باتجاه اليمين، تتباطأ، ثم تعكس اتجاهها، مباشرة من جديد باتجاه اليسار (انظر للشكل (13-6-ب)). ثم تنتقل أسرع وأسرع ثم تتباطأ ثانية، لتصل إلى نقطة البداية في أقصى اليسار، حيث تبدأ بالدوران من جديد. يستمر ذلك بتردد 1 Hz أو دورة كاملة بالثانية، لأنك تُدوِّر الكرة بمعدل دورة بالثانية.

إذا رسمت موضع الكرة كما يراها صديقك بدلالة الزمن، ستكون النتيجة موجة جيبية (الشكل (13-7)). لهذه الموجة الشكل المُميِّز نفسه لجميع الموجات الجيبية. تُوصف الموجة الجيبية القياسية أو الأساسية بالتابع الرياضي $y = \sin x$ في مستوى الإحداثيات (x, y). والشكل العام هو $y = a \sin bx$ حيث إن a وb ثابتان عدديان حقيقيان.

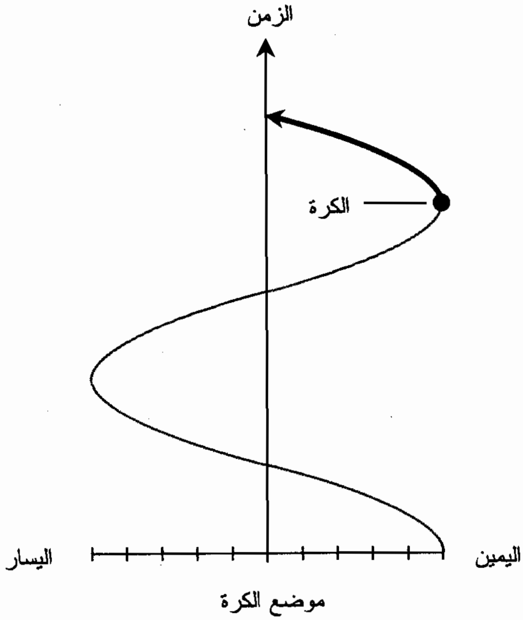


(أ)



(ب)

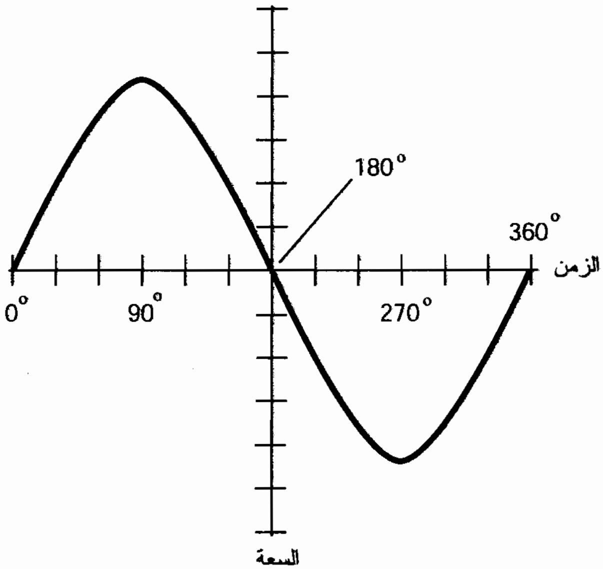
الشكل (13–6): تدوير كرة معلقة بخيط. (أ) كما تُرى من الأعلى؛
(ب) كما تُرى عن بعد في مستوى تحريك الكرة.



الشكل (13–7): موضع الكرة كتابع للزمن كما تُرى عند النظر إليها بشكل جانبي.

الدرجات

إن إحـــدى طـــرق تحديـــد أجزاء دورة ac هي بتقسيمها إلى 360 جزءاً متساوياً حيث تُدعى هذه الأجـــزاء *بالـــدرجات*، ويُرمز لها ° أو deg (ولكن لا مانع من كتابة الكلمة كاملة). تُسند القيمة 0° إلى الـــنقطة من الدورة التي تكون الطويلة فيها صفراً ويكون الانتقال موجباً. تُعطى النقطة نفسها من الدورة اللاحقـــة القيمة 360°. تُعطى نقطة المنتصف بين النقطتين السابقتين القيمة 180°؛ وربع الدورة 90°؛ وثمن الدورة 45°. ويوضح الشكل (13-8) ذلك.



الشكل (13-8): يمكن تقسيم دورة الموجة إلى 360° درجة.

الراديان

الطـــريقة الأخرى لتحديد أجزاء دورة ac هي بتقسيمها إلى 2π أو 6.2832 جزءاً متساوياً. إنه عدد الراديان الموجود على محيط دائرة واحدة. يساوي الراديان الواحد والذي يُرمز له rad (ويمكن كتابة الكلمة كاملـــة)، حوالى 57.296°. يستخدم الفيزيائيون الراديان أكثر من الدرجة في معظم الحالات عند التحدث عن أجزاء دورة ac.

يُقـــاس تردد موجة ac في بعض الأحيان بالراديان بالثانية (rad/s) بدلاً من الهرتز (دورة بالثانية). إن *التـــردد الزاوي* للموجة، مُقدراً بالراديان بالثانية، يساوي 2π التردد بالهرتز وذلك بسبب وجود 2π راديان في الدورة الكاملة 360°. يُرمز للتردد الزاوي بالحرف اللاتيني الصغير المائل أوميغا (ω).

مسألة (13-3)

ما هو التردد الزاوي لتيار ac المنـــزلي؟ افترض أن تردد شبكة ac العامة Hz 60.0.

حل (3-13)

اضـــرب التردد المُقدَّر بالهرتز بالقيمة 2π. إذا اعتبرت أن 2π تساوي القيمة 6.2832، يكون التردد الزاوي عندها

$$\omega = 6.2832 \times 60.0 = 376.992 \text{ rad/s}$$

يجب تقريب هذا العدد بالتدوير إلى 377 rad/s لأن بيانات الدخل مقدمة بثلاثة أرقام هامة فقط.

مسألة (4-13)

يبلغ التردد الزاوي لموجة معينة 3.8865×10^5 rad/s. ما هو التردد بالكيلوهرتز؟ عبِّر عن الجواب بثلاثة أرقام هامة.

حل (4-13)

لحـــل ذلـــك، جدْ أولاً التردد بالهرتز. يستلزم ذلك حساب التردد الزاوي بالراديان بالثانية وذلك بالتقسيم على 2π، والذي يساوي تقريباً 6.2832. ولذلك يكون التردد f_{Hz}

$$f_{Hz} = (3.8865 \times 10^5)/6.2832$$
$$= 6.1855 \times 10^4 \text{ Hz}$$

للحصول على التردد بالكيلو هرتز، قسِّم على 10^3، ثم قرِّب النتيجة بالتدوير إلى ثلاثة أرقام هامة:

$$f_{kHz} = 6.1855 \times 10^4/10^3$$
$$= 61.855 \text{ kHz} \approx 61.9 \text{ kHz}$$

السعة

يمكـــن أن تُدعـــى السعة أيضاً *بالطويلة* أو *المستوى* أو *القوة* أو *الشدة*. يمكن تحديد سعة موجة ac بالأمبير (للتيار)، أو الفولت (للجهد)، أو الوات (للاستطاعة).

السعة الآنية

الـــسعة الآنـــية لموجة ac هي الجهد أو التيار أو الاستطاعة في لحظة زمنية معينة. وتتغير هذه السعة باطـــراد. يعـــتمد مدى تغيّر السعة الآنية على الشكل الموجي. تُمثّل السعات بنقاط فريدة على منحنيات الموجة.

السعة المتوسطة

الـــسعة المتوســـطة لـــموجة ac هـــي المتوسط الرياضي (أو الوسطي) للجهد الآني أو التيار الآني أو الاستطاعة الآنية مقدرة خلال دورة موجية واحدة فقط أو خلال عدد من الدورات الموجية. تكون السعة المتوسطة لموجة ac جيبية تماماً صفراً. وينطبق الأمر نفسه على موجة ac المربعة أو الموجة المثلثية. لا يشكل

ذلـــك الحالـــة العامة بالنسبة لأمواج سن المنشار. يمكنك أن تأخذ فكرة عن سبب صحة هذه المسائل من خلال النظر بإمعان للأشكال الموجية الموضحة في الأشكال من (13–1) إلى (13–5). إذا كنت تعرف حساب التفاضل والتكامل، فإنك تعرف أن السعة المتوسطة هي تكامل الشكل الموجي على طول موجة كاملة.

سعة القمة

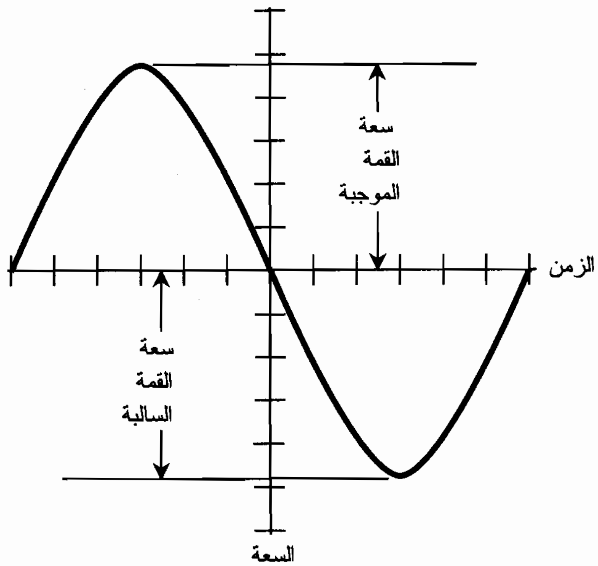
سعة القمة لموجة ac هي المدى الأعظم، الموجب أو السالب، الذي تبلغه السعة الآنية. تكون سعات القمـــة الموجـــبة والسالبة للعديد من الأمواج نفسها. ولكن تختلف هذه السعات في بعض الأحيان. يوضح الـــشكل (13–9) مثالاً لموجة تكون فيها سعة القمة الموجبة مساوية لسعة القمة السالبة. ويوضح الشكل (13–10) موجة تكون فيها سعات القمة الموجبة والسالبة مختلفة.

السعة من القمة – إلى – القمة

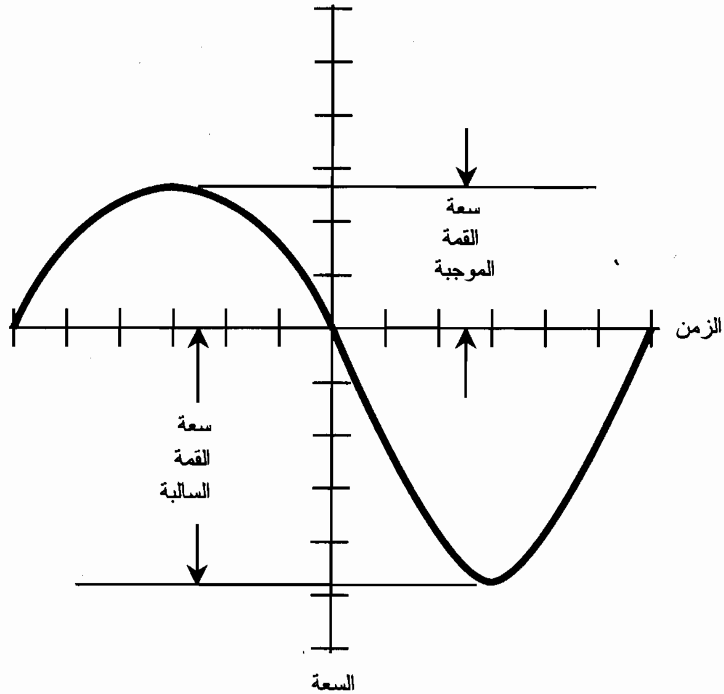
الـــسعة من القمة – إلى – القمة (pk – pk) لموجة هي الفرق الصافي بين سعة القمة الموجبة وسعة القمـــة السالبة (الشكل (13–11)). ونقول ذلك بطريقة أخرى إن السعة من القمة – إلى – القمة تساوي مجموع سعة القمة الموجبة والقيمة المطلقة لسعة القمة السالبة.

تُعتبر السعة من القمة – إلى – القمة طريقة للتعبير عن "تأرجح" مستوى الموجة أثناء الدورة.

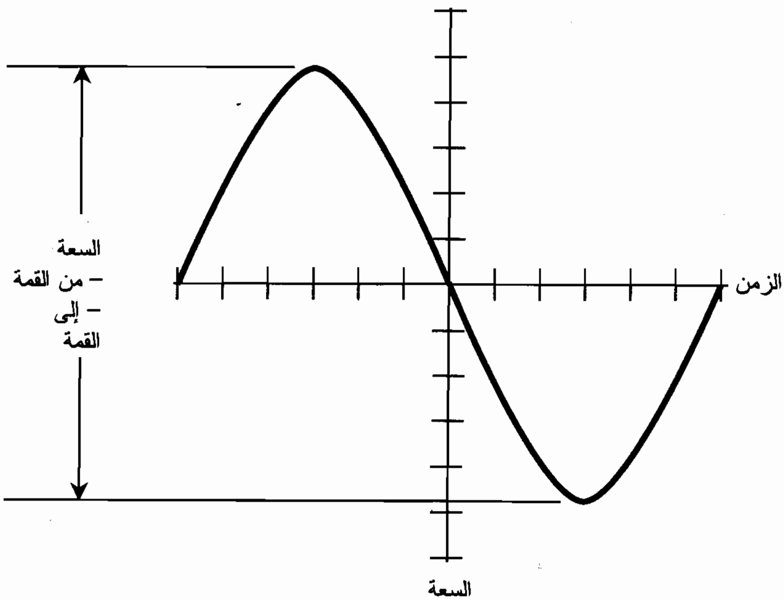
تكون السعة من القمة – إلى – القمة في العديد من الموجات مساوية لضعفي سعة القمة. وهي الحالة التي تكون فيها السعتان الموجبة والسالبة متساويتين.



الشكل (13–9): سعتا القمتين الموجبة والسالبة. السعتان متساويتان في هذه الحالة.



الشكل (13-10): موجة تختلف فيها سعة القمة الموجبة عن سعة القمة السالبة.



الشكل (13-11): سعة من القمة - إلى - القمة.

الجذر التربيعي لمتوسط مربع السعة

في كثير من الأحوال يكون من الضروري التعبير عن *السعة الفعالة* لموجة ac. والسعة الفعّالة هي الجهد أو التيار أو الاستطاعة التي سينتجها مُزوِّد dc والتي يكون لها التأثير العام نفسه في النظام أو الدارة الحقيقية. عندما نقول أن جهد المخرج في الجدار 117 V، فإننا نعني 117 فولتاً فعّالاً. يُدعى الشكل الأكثر شيوعاً لمستويات ac *الفعالة بالجذر التربيعي لمتوسط مربع القيمة* أو *rms*.

تعني عبارة *الجذر التربيعي لمتوسط المربع* أنه يجري "معالجة" الشكل الموجي رياضياً بحساب الجذر التربيعي لمتوسط مربع جميع قيمه الآنية. تختلف سعة rms عن السعة المتوسطة. في الموجة الجيبية الكاملة، تساوي قيمة rms 0.707 أضعاف قيمة سعة القمة أو 0.354 أضعاف قيمة السعة pk – pk. بشكل معاكس، تساوي قيمة سعة القمة 1.414 أضعاف قيمة rms، وتساوي pk–pk 2.828 أضعاف قيمة rms. يجري عادةً اقتباس أرقام rms من مُزوِّدات جهد الموجة الجيبية الكاملة، كجهد الشبكة العامة أو من الجهد الفعال لإشارات الراديو.

تكون قيمة rms بالنسبة لموجة مربعة كاملة، مساوية لقيمة القمة، وتساوي قيمة pk–pk ضعفي قيمة rms وضعفي قيمة القوة. بالنسبة لأمواج سن المنشار والأمواج غير المنتظمة، تعتمد العلاقة بين قيمة rms وقيمة القمة على دقة شكل الموجة. لا تكون قيمة rms أكبر من قيمة القمة في أي شكل موجي.

Dc المُركَّب

قد يكون للموجة في بعض الأحيان مُركّبات ac وdc. المثال الأبسط لمُركّبات ac/dc بوصل مُزوِّد ac، كبطارية، على التسلسل مع مُزوِّد ac، كما في الشبكة العامة.

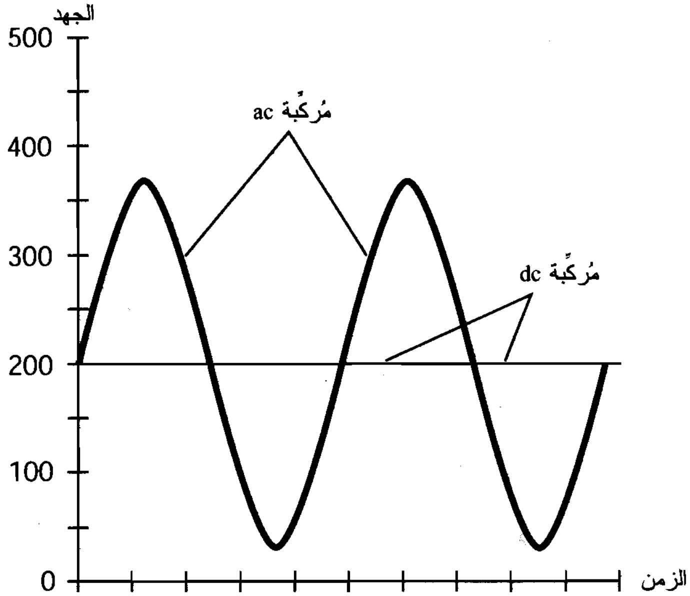
يمكن أن يكون مع أي موجة ac مُركّبة dc. إذا تجاوزت مُركّبة dc قيمة قمة موجة ac، سينجم عنها تأرجح أو خفقان موجة dc. سيحدث ذلك مثلاً، إذا تم وصل مُزوِّد dc قيمته 200–V على التسلسل مع خَرْج الشبكة العامة. سيظهر خفقان موجة dc بقيمة 200 V ولكن بقيم آنية كبيرة وصغيرة. يوضح الشكل (13–12) الشكل الموجي لهذه الحالة.

مسألة (13–5)

يبلغ قياس السعة pk–pk لموجة ac جيبية 60 V. مع العلم أنه لا يوجد أي مُركّبة dc. ما هو جهد القمة؟

حل (13–5)

يكون جهد القمة في هذه الحالة مساوياً تماماً إلى نصف قيمة جهد قمة – إلى – قمة، أو30 pk V. V. نصف القمم 30 +V؛ النصف 30 –V.



الشكل (13–12): موجة ac/dc مُركَّبة من 117 V rms موصولة على التسلسل مع V dc − 200+.

مسألة (13–6)

افترض أنه جرى تركيب مُركّبة dc قيمتها 10+ V على الموجة الجيبية الموصوفة في المسألة (13–5). ما هو جهد القمة؟

حل (13–6)

لا يمكن الإجابة عن هذا السؤال ببساطة، وذلك لاختلاف القيم المطلقة لجهود القمة الموجبة والسالبة. في حالة المسألة (13–5)، القمة الموجبة 30+ V والقمة السالبة 30- V. وبالتالي فإن القيم المطلقة متساوية. ولكن، عند تركيب مُركّبة dc قيمتها 10+ V على الموجة، يتغيّر كل من جهد القمة الموجبة والسالبة بمقدار 10+ V. لذلك يصبح جهد القمة الموجب 40+ V، ويصبح جهد القمة السالب 20- V.

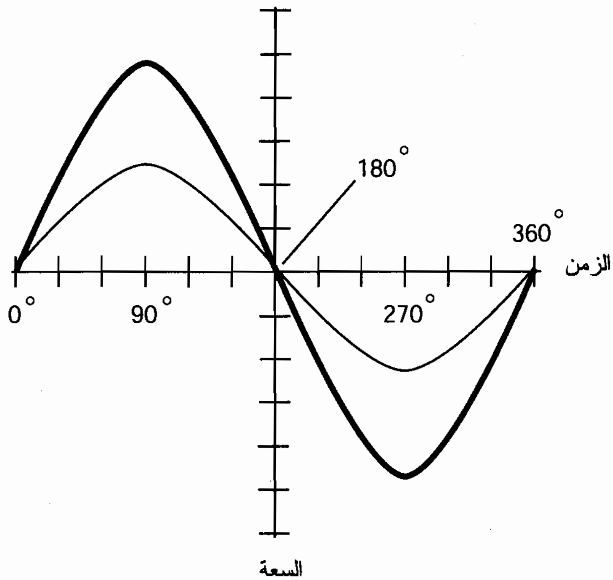
زاوية الطور

زاوية الطور هي تعبير عن الإزاحة بين موجتين ترددها متطابقان. يوجد طرق متنوعة لتحديد ذلك. يجري التعبير عن زوايا الطور عادةً بقيم مثل Φ بحيث تكون $0^\circ \leq \Phi < 360^\circ$. وهذا المجال بالراديان $0 \leq \Phi < 2\pi$. ستسمع من حين لآخر عن زوايا طور محددة وفق المجال $-180^\circ < \Phi \leq +180^\circ$. وهذا المجال بالراديان $-\pi < \Phi \leq +\pi$. يمكن فقط تحديد زاوية الطور في زوج من الأمواج ذات الترددات المتماثلة. إذا اختلفت الترددات، يختلف الطور من لحظة إلى لحظة ولا يمكن الإشارة له بعدد محدد.

توافق الطور

يعـــني توافق الطور أن الموجتين تبدآن في اللحظة نفسها تماماً. إنهما "منسجمتان". يوضح الشكل (13-13) موجتين لهما سعات مختلفة. (إذا كانت السعات متماثلة سترى موجة واحدة فقط). يكون فرق الطور في هذه الحالة 0^o.

إذا كانـــت الموجـــتان متوافقـــتين بالطور، فإن سعة قمة الموجة الناتجة، والتي ستكون أيضاً موجة جيبيـــة، مساوية لمجموع سعات القمة لتركيب الموجتين. ويكون طور الموجة الناتجة هو نفسه طور الأمواج المُركّبة.



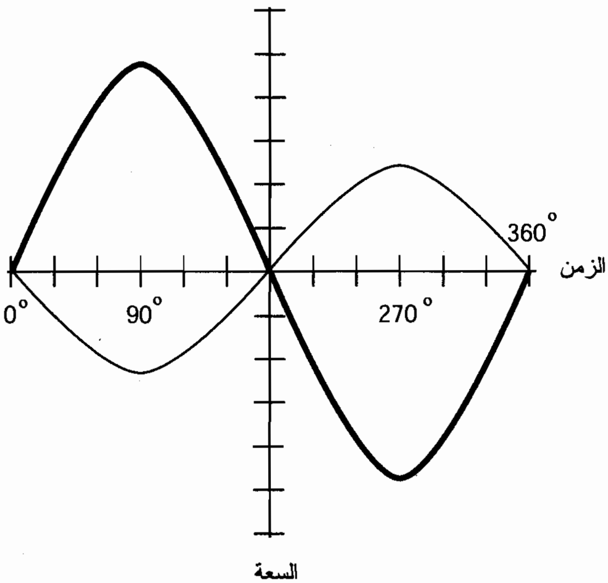
الشكل (13-13): موجتان جيبيتان متوافقتان بالطور.

تعاكس الطور

يقال عن موجتين إنهما *متعاكستان بالطور* عندما تبدأ الموجتان الجيبيتان بتباعد مقداره 180^o تماماً. إن ذلك موضح في رسوم الشكل (13-14).

إذا كـــان لموجتين جيبيتين السعات نفسها وكانتا متعاكستين بالطور، فإنهما تُلغيان بعضهما البعض لأن السعات الآنية للموجتين متساويتان ومتعاكستان في كل لحظة من الزمن.

إذا كان لموجتين جيبيتين سعات مختلفة وكانتا متعاكستين بالطور، فإن قيمة قمة الموجة الناتجة، وهي مـــوجة جيبية، تساوي إلى الفرق بين قيم قمم الموجتين المركبتين. ويكون طور الموجة الناتجة مساوياً طور أقوى الموجتين المركبتين.



الشكل (13-14): موجتان جيبيتان متعاكستان بالطور.

الطور المرشد

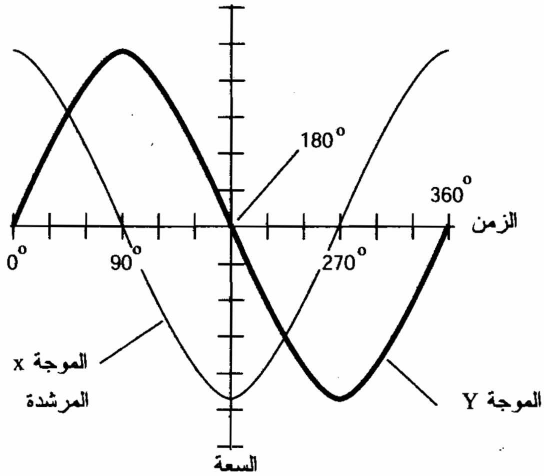
افترض أنه يوجد موجتان جيبيتان، الموجة X والموجة Y، وافترض أن ترددادهما متطابقة. إذا بدأت الموجة X قبل الموجة Y بجزء من الدورة، يُقال عندها إذاً عن الموجة X أنها *مرشدة للموجة* Y بالطور. ليكون ذلك صحيحاً، يجب أن تبدأ X دورتها قبل Y بطور أقل من $180°$ (الشكل (13-15)) الموجة X ترشد الموجة Y بمقدار $90°$. يمكن أن يكون الفرق في الطور مساوياً أي عدد أكبر من $0°$ ولكن أصغر من $180°$ ولكن لا يتضمنهما.

يجري في بعض الأحيان التعبير عن الطور المرشد بزاوية الطور Φ بحيث إن $0° < \Phi < +180°$. وبالراديان $0 < \Phi < +\pi$. إذا قلنا بأن للموجة X طور $+\pi/2$ rad بالنسبة للموجة Y، فإننا نعني أن الموجة X ترشد الموجة Y بطور $\pi/2$ rad.

طور التأخير

افترض أن الموجة X باشرت دورتها بعد الموجة Y بطور أكبر من $180°$ ولكن أصغر من $360°$، من الأسهل في هذه الحالة، تخيل أن الموجة X قد بدأت دورتها بعد الموجة Y بقيمة ما تقع بين $0°$ و$180°$ ولكن لا تتضمنهما. الموجة X موجة *متأخرة* عن الموجة Y. الشكل (13-16) يظهر أن الموجة X متأخرة عن الموجة Y بمقدار $90°$. يمكن أن يكون الفرق في الطور مساوياً أي عدد بين $0°$ و$180°$ ولكن لا يتضمنهما.

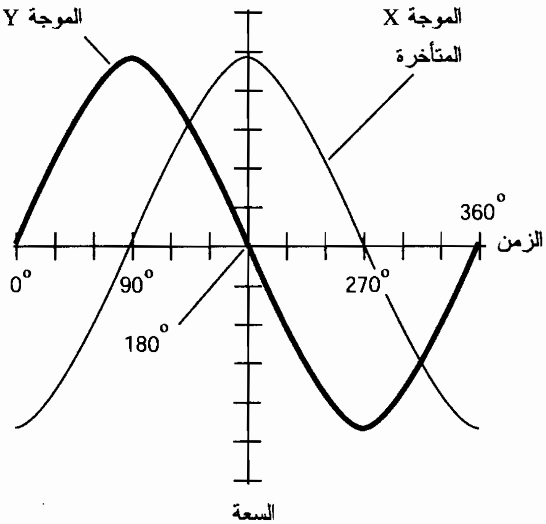
يجري في بعض الأحيان التعبير عن طور التأخير بزاوية سالبة Φ بحيث تكون $-180° < \Phi < 0°$. وبالراديان $-\pi < \Phi < 0$. إذا قلنا بأن للموجة X طور $-45°$ بالنسبة للموجة Y، فإننا نعني أن الموجة X متأخرة بالطور عن الموجة Y بمقدار $45°$.



الشكل (13-15): الموجة X ترشد الموجة Y بطور 90°.

التمثيلات الشعاعية للطور

إذا كانت الموجة الجيبية X مرشدة للموجة الجيبية Y بطور x درجة، يمكن إذاً رسمها كأشعة، بواسطة شعاع X موجه x درجة بعكس عقارب الساعة عن الشعاع Y. إذا كانت الموجة X متأخرة عن الموجة Y بمقدار y درجة، وبالتالي يُوجّه الشعاع X بزاوية y درجة مع عقارب الساعة بالنسبة للشعاع Y. إذا كانت الموجـــتان متوافقتين بالطور، تتراكب أشعتهما، أما إذا كانت الموجتان متعاكستين بالطور، يتجه الشعاعان باتجاهات متعاكسة تماماً.



الشكل (13-16): الموجة X المتأخرة بالطور 90° عن الموجة Y.

يوضح الشكل (13–17) أربع علاقات للطور بين الأمواج X وY. تساوي سعة الموجة X دائماً ضعفي سعة الموجة Y، وبالتالي الشعاع X أطول بمرتين من الشعاع Y. في القسم أ، الموجتان X وY متوافقتان بالطور. في القسم ب، ترشد الموجة X الموجة Y بطور $90°$. في القسم ج، الموجتان X وY متعاكستان $180°$ بالطور. في القسم د، تتأخر الموجة X عن الموجة Y بمقدار $90°$.

تدور الأشعة في جميع الحالات بعكس عقارب الساعة بمعدل دائرة كاملة واحدة بدورة الموجة. رياضياً، يجري التعبير عن الموجة الجيبية بشعاع يدور ويدور ككرة مربوطة بخيط وتقوم بتدويرها حول رأسك.

تبقى طويلة شعاع الموجة الجيبية ثابتة دائماً. إذا لم يكن الشكل الموجي جيبياً، تكون طويلة الشعاع أكبر في بعض الاتجاهات منه في بعض الاتجاهات الأخرى. كما تتوقع يوجد عدد لا نهائي من الحالات المختلفة في هذا الموضوع، ويمكن أن يكون بعض هذه الحالات معقداً.

مسألة (13–7)

افترض وجود ثلاث موجات X، وY، وZ. ترشد الموجة X الموجة Y بطور 0.5000 rad. ترشد الموجة Y الموجة Z بثمن دورة تماماً. بكم درجة ترشد الموجة X الموجة Z أو تتأخر عنها؟

حل (13–7)

لحل هذه المسألة، دعنا نحول جميع قياسات زوايا الطور إلى درجات، يساوي الراديان تقريباً $57.296°$؛ لذلك، $0.5000\ \text{rad} = 57.296° \times 0.5000 = 28.65°$ (مُقرِّباً الجواب إلى أربعة أرقام هامة). ثمن الدورة يساوي $45.00°$ (أي $360°/8.000$). لذلك يجري جمع زوايا الطور، أي أن الموجة X ترشد الموجة Z بمقدار $28.65° + 45.00°$ أو $73.65°$.

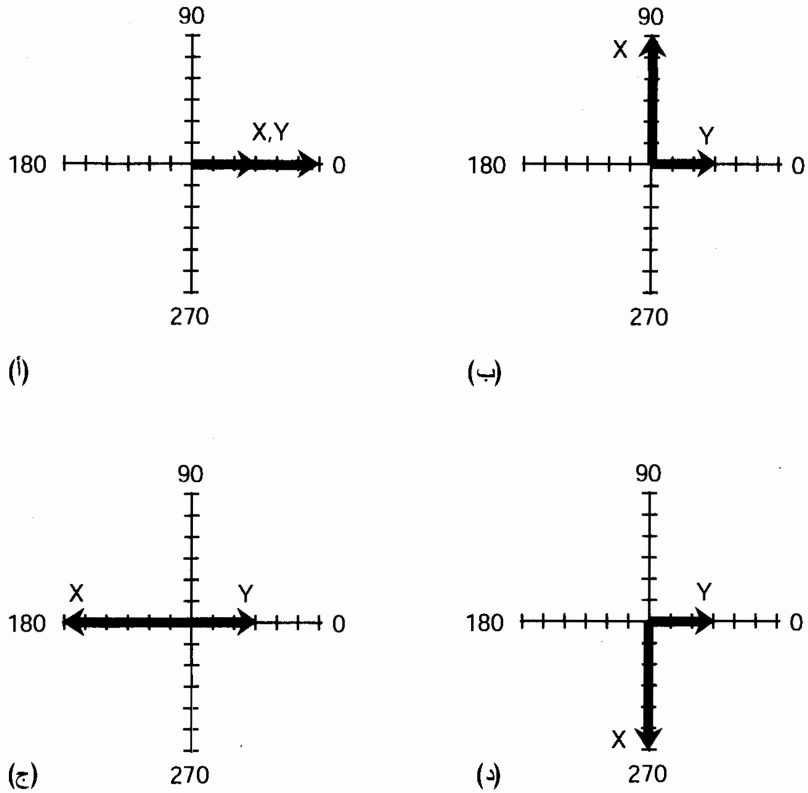
مسألة (13–8)

افترض وجود ثلاث موجات X، وY، وZ. الموجة X ترشد الموجة Y بمقدار 0.5000 rad؛ الموجة Y تتأخر عن الموجة Z بثمن دورة تماماً. بكم درجة ترشد الموجة X الموجة Z أو تتأخر عنها؟

حل (13–8)

الفرق في الطور بين X وY في هذه المسألة هو نفسه في المسألة السابقة، أي $28.65°$. الفرق بين Y وZ نفسه أيضاً، ولكن بالاتجاه المعاكس. تتأخر الموجة Y عن الموجة Z بطور $45.00°$–، وهذا يُماثل قولنا إن الموجة Y ترشد الموجة Z بطور $45.00°$–، لذلك الموجة X ترشد الموجة Z بطور ($-45.00°+28.65°$)، والذي يكافئ $28.65°–45.00°$ أو $16.35°$- الأفضل في هذه الحالة أن نقول إن الموجة X متأخرة عن الموجة Z بطور $16.35°$ أو أن الموجة Z مرشدة للموجة X بطور $16.35°$.

كما ترى، قد تكون علاقات الطور مربكة. تحدث الحالة نفسها عندما نتحدث عن الأعداد السالبة. أي الأعداد تكون أكبر؟ يعتمد ذلك على نقطة المراقبة. إذا كان رسم صور الأمواج يساعدك على التفكير بالطور فارسمها.



الشكل (13-17): التمثيلات الشعاعية للطور. (أ) الموجتان X وY متفقتان بالطور؛ (ب) الموجة X ترشد الموجة Y بطور 90 درجة؛ (ج) الموجتان X وY متعاكستين بالطور؛ (د) الموجة X تتأخر عن الموجة Y بطور 90 درجة.

امتحان موجز

عـــد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. كم راديان تقريباً موجود في ربع دورة؟

(a) 0.7854

(b) 1.571

(c) 3.142

(d) 6.284

2. عد إلى الشكل (13-18). افترض أن كل تدريجة أفقية تُمثّل (1.0×10^{-9} s) 1.0 ns وأن كل تدريجة عامودية تُمثّل (1.0×10^{-3} V) 1 mV. ما هو جهد rms التقريبي؟ افترض أن الموجة جيبية.

(a) 4.8 mV

(b) 9.6 mV

(c) 3.4 mV

(d) 6.8 mV

3. في المـــوجة الموضحة في الشكل (13-18)، مع اعتبار خصائص المسألة السابقة نفسها، ما هو التردد التقريبي لهذه الموجة؟

(a) 330 MHz

(b) 660 MHz

(c) 4.1×10^{9} rad/s

(d) لا يمكن تحديد التردد من هذه المعلومات.

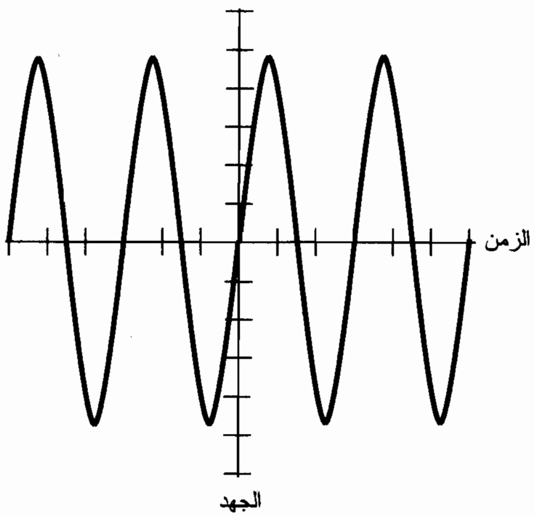
4. في المـــوجة الموضحة في الشكل (13-18)، ما هو الجزء من الدورة، بالدرجات، الذي تُمثّله تدريجة أفقية واحدة؟

(a) 60

(b) 90

(c) 120

(d) 180



الشكل (13-18): توضيح لأسئلة الامتحان الموجز 2، و3، و4.

5. يـبلغ التيار الآني الأعظم لموجة dc متقلبة خلال بضع دورات mA +543. ويبلغ التيار الآني الأصغر mA +105، وخلال عدة دورات أيضاً. ما هو التيار من القمة-إلى-القمة لهذه الموجة؟
(a) mA 438
(b) mA 648
(c) mA 543
(d) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

6. يبلغ جهد pk – pk لموجة مربعة V 5.50. الموجة موجة ac، ولكن لها مُركّبة dc قيمتها V +1.00 . ما هو الجهد الآني؟
(a) نحتاج لمزيد من المعلومات للإجابة عن هذا السؤال.
(b) +V 3.25
(c) −V 1.25
(d) +V 1.00

7. بأخذ حالة السؤال السابق، ما هو الجهد المتوسط؟
(a) نحتاج لمزيد من المعلومات للإجابة عن هذا السؤال.
(b) +V 3.25
(c) −V 1.25
(d) +V 1.00

8. لنفترض وجود موجتين جيبيتين ترددامما متطابقة وبين شعاعيهما زاوية قائمة. ما هو الفرق في الطور؟
(a) نحتاج لمزيد من المعلومات للإجابة عن هذا السؤال.
(b) 90°
(c) 180°
(d) 2π rad

9. الموجة المربعة هي شكل خاص
(a) للموجة الجيبية.
(b) لموجة سن المنشار.
(c) للموجة الخطية (ramp).
(d) للموجة المستطيلة.

10. موجة ac ترددها ثابت f. جرى مضاعفة جهد القمة V_{pk}. ماذا يحدث للدور T؟
(a) يتضاعف إلى $2T$.
(b) ينخفض إلى $T/2$.
(c) ينخفض إلى $0.707T$.
(d) يبقى T.

الفصل 14

المغنطيسية

إن دراسة المغنطيسية هي علم قائم بحد ذاته. تتفاعل الظواهر المغنطيسية والكهربائية؛ يمكن أن تملأ الدراسة المفصلة للمغنطيسية والكهرطيسية كتاباً. توجد المغنطيسية حيثما توجد شحنات كهربائية تتحرك بالنسبة لجُسَيْمات أخرى أو تتحرك بالنسبة لإطار مرجعي.

المغنطيسية الأرضية

تحوي نواة الأرض بشكل كبير على حديد مسخن إلى درجة بحيث يكون بعضه سائلاً. يجري الحديد بطرق معقدة نتيجة لدوران الأرض. يؤدي هذا الجريان لظهور حقل مغنطيسي هائل، يدعى *الحقل المغنطيسي الأرضي*، الذي يحيط بالأرض.

المحاور والأقطاب المغنطيسية الأرضية

للحقل المغنطيسي الأرضي أقطاب تشبه أقطاب المغنطيس. إن هذه الأقطاب ليست قريبة من الأقطاب الجغرافية. يتموضع *القطب المغنطيسي الأرضي الشمالي* في منطقة الجزيرة المتجمدة في شمال كندا. يقع *القطب المغنطيسي الأرضي الجنوبي* في المحيط بالقرب من القارة القطبية الجنوبية. وبالتالي يكون *المحور المغنطيسي الأرضي* قريباً إلى حدّ ما من المحور الذي تدور حوله الأرض. وليس ذلك فقط، لا يمر المحور المغنطيسي الأرضي من مركز الأرض. فالأرض تشبه نواة التفاحة منزوعة المركز.

الريح الشمسية

تتدفق الجُسَيْمات المشحونة من الشمس باستمرار خارجاً باتجاه النظام الشمسي، لتشوه الحقل المغنطيسي الأرضي. تغيّر هذه *الريح الشمسية* في الحقيقة شكل الحقل المغنطيسي الأرضي. يكون الحقل مضغوطاً في وجه الأرض المواجه للشمس؛ يكون الحقل ممدداً في الوجه المعاكس للشمس. تؤثر الريح الشمسية على الحقول المغنطيسية المتواجدة حول الكواكب الأخرى ويكون التأثير ملحوظاً بشكل كبير على كوكب المشتري.

أثناء دوران الأرض، يدور الحقل المغنطيسي الأرضي ويلتف في الفضاء بحيث يبتعد عن وجه الشمس. يكـــون الحقل على سطح الأرض وبالقرب منه متناظراً تقريباً بالنسبة للأقطاب المغنطيسية الأرضية. بزيادة البعد عن الأرض، يزداد مدى تشوه الحقل المغنطيسي الأرضي.

البوصلة المغنطيسية

لـــوحظ وجود الحقل المغنطيسي الأرضي في الأزمنة الغابرة. عند تعليق صخور معينة تدعى *بحجارة المغنطـــيس* بخيط، فإنها توجه نفسها عموماً باتجاه شمال – جنوب. جرى تبرير ذلك قديماً بوجود "قوة" في الهـــواء. وكـــان ذلـــك قـــبل تفـــسير أسباب هذه الظاهرة، ولكن استُخدم هذا التأثير من قبل الملاحين والمستكـــشفين. لا تزال *البوصلة المغنطيسية* وسيلة مساعدة ملاحية ذات قيمة، ولا تزال مستخدمة من قبل البحارة، والمسافرين، ومن يسافر بعيداً عن نقاط المعالم المألوفة. تستطيع البوصلة العمل عندما تُخفق أجهزة الملاحة المعقدة.

يتفاعل الحقل المغنطيسي الأرضي والحقل المغنطيسي الموجود حول إبرة البوصلة بحيث تُطبَّق قوة على المغنطـــيس الصغير داخل الإبرة. لا تعمل هذه الإبرة في المستوى الأفقي فقط (الموازي لسطح الأرض) بل تعمل في المستوى العامودي أيضاً، وفي معظم المواضع. تكون المُركّبة العامودية في خط الاستواء المغنطيسي الأرضي صفراً، وخط الاستواء المغنطيسي الأرضي هو خط يلتف حول الكرة الأرضية على مسافة متساوية من القطبين المغنطيسيين الأرضيين. بزيادة *زاوية العرض المغنطيسية* الأرضية باتجاه القطب المغنطيسي الأرضي الجـــنوبي أو الشمالي، تشد القوة المغنطيسية إبرة البوصلة إلى الأعلى والأسفل أكثر وأكثر، تُدعى قيمة هذه المُـــركّبة العامودية في أي موضع خاص *بميل* الحقل المغنطيسي الأرضي في ذلك الموضع، قد تلاحظ ذلك إذا حملـــت بوصلة. تبدو إحدى نهايتي الإبرة وكأنها تصر على لمس وجه البوصلة، بينما تتجه النهاية الأخرى للأعلى باتجاه الزجاج.

القوة المغنطيسية

اكتـــشف معظمـــنا عندما كنا أطفالاً "جذب" المغانط لبعض المعادن. تدعى مواد الحديد، والنيكل، والخلائط التي تحتوي على أي من هذين العنصرين *بالمواد الفيرومغنطيسية*. تُطبِّق هذه المغانط قوة على هذه المعـــادن. لا تُطـــبِّق المغانط عموماً قوة على المعادن الأخرى إذا لم تمر في هذه المعادن تيارات كهربائية. لا تجذب المغانط المواد العازلة كهربائياً في الشروط الطبيعية.

السبب والقوة

عند تقريب المغنطيس من قطعة من مادة فيرومغنطيسية، تنتظم الذرات في المادة وبالتالي يُمغنَط المعدن آنياً. يُنتج ذلك *قوة مغنطيسية* بين ذرات المادة الفيرومغنطيسية وذرات المغنطيس.

إذا كـــان المغنطـــيس قريباً من مغنطيس آخر، تكون القوة أكبر من القوة الناتجة عن وجود المغنطيس

نفسه قريباً من مادة فيرومغنطيسية. بالإضافة لذلك، يمكن أن تكون القوة تنافرية (تتنافر المغانط أو تتباعد عن بعضها) أو تجاذبية (تنجذب المغانط أو تندفع باتجاه بعضها) اعتماداً على طريقة لف المغانط. تصبح القوة أكبر وأكبر باقتراب المغانط من بعضها.

إن بعض المغانط قوية جداً بحيث لا يستطيع الإنسان إبعادها عما جذبته إليها، ولا يستطيع إنسان لصقها ببعضها والتغلب على القوة التنافرية التبادلية بينهما. ينطبق ذلك على *المغانط الكهربائية* التي سنناقشها لاحقاً في هذا الفصل. تُستخدم قوى التجاذب الضخمة في الصناعة. يمكن استخدام مغنطيس كهربائي ضخم لحمل قطع ثقيلة من الفولاذ أو لنقل الحديد الخردة من مكان إلى آخر. يمكن أن تُزوِّد بعض المغانط الكهربائية الأخرى بتنافر كافٍ لرفع جسم فوق جسم آخر. يدعى ذلك *بالوسادة المغنطيسية* (magnetic levitation).

حوامل الشحنة الكهربائية في الحركة

كلما انحازت ذرات مادة فيرومغنطيسية، يتواجد حقل مغنطيسي. يمكن أن ينتج الحقل المغنطيسي أيضاً من حركة حوامل *الشحنة الكهربائية* في سلك أو في الفضاء الحر.

يزداد الحقل المغنطيسي حول *مغنطيس دائم* نتيجة للسبب نفسه الذي يزداد به الحقل المغنطيسي حول سلك يمر فيه تيار كهربائي. إن العامل المسؤول في كلتا الحالتين هو حركة الجُسيْمات المشحونة كهربائياً. تنتقل الإلكترونات في السلك على طول الناقل من ذرة إلى ذرة. في المغانط الدائمة، تتحرك الإلكترونات المدارية بأسلوب مماثل لتحرك الإلكترونات في الذرات الفردية بحيث تؤدي لإنتاج "تيار فعال".

يمكن إنتاج الحقول المغنطيسية بواسطة حركة الجُسيْمات المشحونة في الفضاء. تقذف الشمس باستمرار البروتونات ونوى الهيليوم. تحمل هذه الجُسيْمات شحنة كهربائية موجبة. ينتج عن ذلك "تيارات فعالة" عند انتقالها في الفضاء. وتُولِّد هذه التيارات بدورها حقولاً مغنطيسية. عندما تتفاعل هذه الحقول مع الحقل المغنطيسي الأرضي، تُجبَر هذه الجُسيْمات على تغيير الاتجاه، ويجري تسريعها باتجاه الأقطاب المغنطيسية الأرضية.

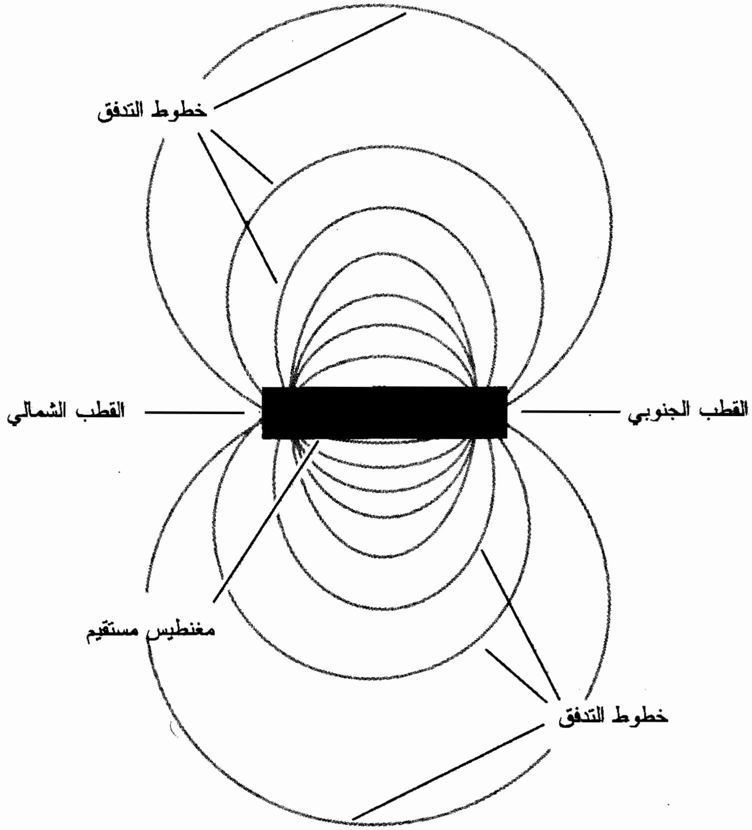
إذا حصل انفجار في الشمس يُدعى *بالانفجار الشمسي*، تقذف الشمس جُسيْمات مشحونة بشكل أكثر من المعتاد. تستطيع الحقول المغنطيسية لهذه الجُسيْمات، عند وصولها إلى الأقطاب المغنطيسية الأرضية، من خلال عملها المشترك، تشويش الحقل المغنطيسي الأرضي. إذاً يوجد عندها *عاصفة مغنطيسية أرضية* تؤدي لتغيرات في طبقة الأيونسفير الأرضية، التي تؤثر على الاتصالات الراديوية طويلة المسافة وذات الترددات المعينة. إذا كانت التأرجحات شديدة بشكل كافٍ، يمكن أن تتداخل هذه الحقول مع الاتصالات السلكية وتتداخل مع خطوط نقل القدرة الكهربائية. تكون عمليات الإرسال بالأمواج الميكروية عموماً منيعة تجاه تأثيرات العواصف المغنطيسية الأرضية. لا تتأثر ارتباطات كابل الليف الضوئي والاتصالات الليزرية في الفضاء الحر بالعواصف المغنطيسية. تُلاحظ ظاهرة أورورا (Aurora) (الأضواء القطبية الشمالية أو الجنوبية) كثيراً في الليل أثناء العواصف المغنطيسية الأرضية.

خطوط التدفق

يعتــبر الفيــزيائيون أن الحقــول المغنطيسية مُكوَّنة من *خطوط التدفق*، تُحدد شدة الحقل وفقاً لعدد خطوط التدفق المارة في مقطع معين، كسنتيمتر مربع (cm^2) أو متر مربع (m^2). لا تشكل الخطوط مسالك فعلية في الفضاء، ولكن من الجذاب بديهياً تخيلها بهذه الطريقة ويمكن توضيح وجودها بتجارب بسيطة.

هل رأيت البرهان التقليدي حيث يجري وضع كمية من برادة الحديد على ورقة، ثم يُوضع مغنطيس تحــت الورقة؟ تنتظم البرادة بشكل يوضح تقريباً، "شكل" الحقل المغنطيسي في جوار المغنطيس. إن خطوط تدفق حقل المغنطيس المستقيم ذات نموذج مميز (الشكل (14-1)).

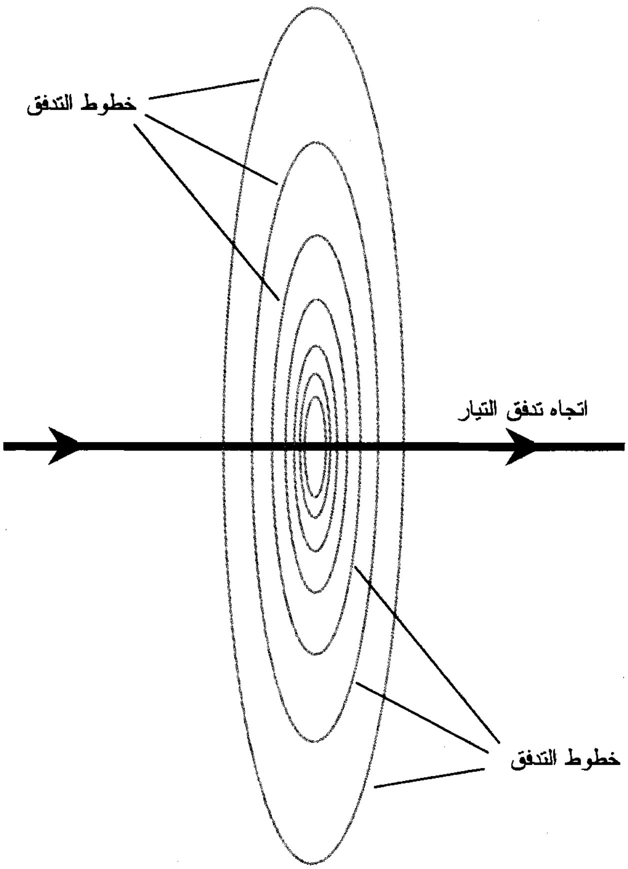
تستلزم التجربة الأخرى تمرير سلك يجري تيار فيه في ورقة بشكل عامودي. تتجمع برادة الحديد على شكل دوائر متمركزة في نقطة مرور السلك في الورقة. يوضح ذلك أن خطوط التدفق دائرية كما تُرى من أي مستوى مار في السلك ويشكل معه زاوية قائمة. تتمركز دوائر التدفق على محور السلك أو على المحور الذي تنتقل حوامل الشحنة فيه (الشكل (14-2)).



الشكل (14-1): التدفق المغنطيسي حول مغنطيس مستقيم.

القطبية

للحقـــل المغنطيسي اتجاه أو توجه، وذلك في أي نقطة من الفضاء تكون قريبة من المغنطيس الدائم أو قـــريبة من السلك الحامل للتيار. تجري خطوط التدفق بشكل موازٍ لاتجاه الحقل. نعتبر أن الحقل المغنطيسي يبدأ أو يخرج من *القطب الشمالي* وينتهي أو يدخل من *القطب الجنوبي*. إن هذه الأقطاب لا تشبه الأقطاب المغنطيـــسية الأرضية؛ في الحقيقة، الأمر يُعاكس ما افترضناه! إن القطب المغنطيسي الأرضي الشمالي هو في الحقيقة القطب المغنطيسي الجنوبي لأنه يجذب الأقطاب الشمالية للبوصلات المغنطيسية. بشكل مشابه، فإن القطـــب المغنطيسي الأرضي الجنوبي هو في الحقيقة القطب المغنطيسي الشمالي لأنه يجذب الأقطاب الجنوبية للبوصلات المغنطيسية. في حالة المغنطيس الدائم، يظهر عادةً - ولكن ليس دائماً - مكان تموضع الأقطاب المغنطيـــسية. في السلك الحامل للتيار، ينتقل الحقل المغنطيسي حول السلك بشكل لا نهائي ككلب يطارد ذيله.



الشكل (14-2): التدفق المغنطيسي الناتج عن حوامل الشحنة المتحركة في خط مستقيم.

إن الجُسيْم الكهربائي المشحون، كالبروتون، الذي يحوم في الفضاء هو أحادي *القطب الكهربائي*، وخطوط التدفق الكهربائي حوله ليست مغلقة. لا تترافق الشحنة الموجبة مع الشحنة السالبة. تخرج خطوط التدفق الكهربائي لأي جُسيْم مستقر مشحون في جميع الاتجاهات لمسافة غير محدودة نظرياً. ولكن، الحقل المغنطيسي مختلف. في الظروف الطبيعية، تكون جميع خطوط التدفق المغنطيسي عبارة عن حلقات مغلقة. يوجد دائماً في المغانط الدائمة نقطة بداية (القطب الشمالي) ونقطة نهاية (القطب الجنوبي). تكون الحلقات عبارة عن دوائر حول السلك الحامل للتيار. يمكن رؤية ذلك بشكل جلي في تجارب برادة الحديد على الورقة.

ثنائيات الأقطاب وأحاديات الأقطاب

ربما فكرت لأول مرة أن سبب الحقل المغنطيسي الموجود حول السلك الحامل للتيار هو حقل ناتج عن أحادي القطب، أو أنه لا يوجد أقطاب على الإطلاق لأن الدوائر متحدة المركز لا تبدأ من مكان ما بوضوح أو تنتهي في مكان محدد. ولكن، فكر بأي مستوى هندسي يحوي السلك. يتشكل *ثنائي القطب* المغنطيسي أو زوج الأقطاب المغنطيسية المتعاكسة، من خطوط تدفق تنتقل نصف المسافة حول أي من الجانبين. وكأنهما في الحقيقة "مغنطيسان" يلتصقان ببعضهما. وبالتالي لا تكون الأقطاب الشمالية والأقطاب الجنوبية نقاطاً بل تكون أوجهاً متلاصقة المستوى.

تصل خطوط التدفق دائماً بين القطبين في جوار ثنائي القطب المغنطيسي. إن بعض خطوط التدفق مستقيمة بالمعنى المحلي، ولكنها تكون دائماً على شكل منحنيات بالمعنى الأوسع. يكون الحقل المغنطيسي حول المغنطيس المستقيم أشد قوة في جوار الأقطاب، حيث تتقارب خطوط التدفق. ويكون الحقل المغنطيسي حول السلك الحامل للتيار أشد قوة بجوار السلك.

قوة الحقل المغنطيسي

تُقاس الطويلة الكلية للحقل المغنطيسي بوحدات تدعى *ويبر*، ويُرمَز لها Wb. تُستخدم في بعض الأحيان وحدة أصغر تدعى *ماكسويل* (Mx) وذلك إذا كان الحقل المغنطيسي ضعيفاً جداً. واحد ويبر يساوي 100 مليون ماكسويل. إذاً $1\ \text{Wb} = 10^{8}\ \text{Mx}$، و $1\ \text{Mx} = 10^{-8}\ \text{Wb}$.

التسلا وغاوص

إذا كان لديك مغنطيس دائم أو مغنطيس كهربائي، قد يُعبَّر عن قوته بالويبر أو بالماكسويل. ولكن ستسمع أو تقرأ غالباً عن وحدة تدعى التسلا (T) أو الغاوص (G). تُمثّل هذه الوحدات مصطلحات تُعبِّر عن تركيز أو شدة الحقل المغنطيسي في مقطع معين. تُعتبَر *كثافة التدفق* أو عدد "خطوط التدفق في وحدة مساحة المقطع"، مصطلحات ذات فائدة أكبر للتأثيرات المغنطيسية من مصطلحات الكمية الكلية للمغنطيسية. يُشار لكثافة التدفق في المعادلات عادةً بالحرف B. إنّ كثافة تدفق مقدارها 1 تسلا تساوي 1

ويبر بالمتر المربع ($1\ Wb/m^2$). إنّ كثافة تدفق مقدارها 1 غاوص تساوي 1 ماكسويل بالسنتيمتر المربع ($1\ Mx/cm^2$). من الواضح أن الغاوص يكافئ تماماً 0.0001 تسلا. أي $1\ G = 10^{-4}\ T$، و$1\ T = 10^4\ G$. للتحويل من التسلا إلى الغاوص، اضرب بالعدد 10^4؛ للتحويل من الغاوص إلى التسلا، اضرب بالعدد10^{-4}.

إذا كان التمييز بين الويبر والتسلا أو بين الماكسويل والغاوص مربكاً لك، فكِّر بالمصباح الضوئي. افترض أن المصباح يُصدر استطاعة ضوئية مرئية قيمتها 20 W. إذا غلّفت المصباح بشكل كامل فإنه سيصل 20 W من الضوء المرئي إلى الجدران الداخلية للحجرة، أياً يكن حجم الحجرة صغيراً أو كبيراً. ولكن، لا يُعبِّر ذلك بشكل جيد جداً عن سطوع الضوء. أنت تعلم أن المصباح الواحد يقدم وفرة من الضوء لممر صغير ولكن لا يقدم أبداً إنارة كافية لقاعة رياضية. الاعتبار المهم هو عدد الواتات *بوحدة المساحة*. عندما نقول إن المصباح يصدر عدداً من الواتات من الضوء المرئي، فإنه يشبه قولنا أن المغنطيس يمتلك مغنطيسية كلية تبلغ عدداً كبيراً من الويبر أو الماكسويل. عندما نقول إن المصباح يُنتج عدداً معيناً من الواتات بوحدة المساحة، فإنه يشبه قولنا إنه للحقل المغنطيسي كثافة تدفق تبلغ عدداً من التسلا أو الغاوص.

الأمبير - لفة والغيلبيرت

تُوظَّف وحدة أخرى عند العمل مع المغانط الكهربائية. إنها وحدة *أمبير - لفة* (At). وهي وحدة *القوة المحركة المغنطيسية*. يُنتج سلك ملفوف على شكل دائرة ويمر فيه تيار شدته 1 A قوة محركة مغنطيسية قيمتها 1 At. إذا جرى لف السلك على شكل حلقة تحوي 50 لفة، وبقي التيار نفسه، تصبح القوة المحركة المغنطيسية الناتجة 50 ضعف الحالة السابقة أي 50 At. إذا جرى تخفيض التيار المار في الحلقة المُكوَّنة من 50 لفة إلى 1/50 A أو 20 mA، ستنخفض القوة المحركة المغنطيسية إلى 1 At.

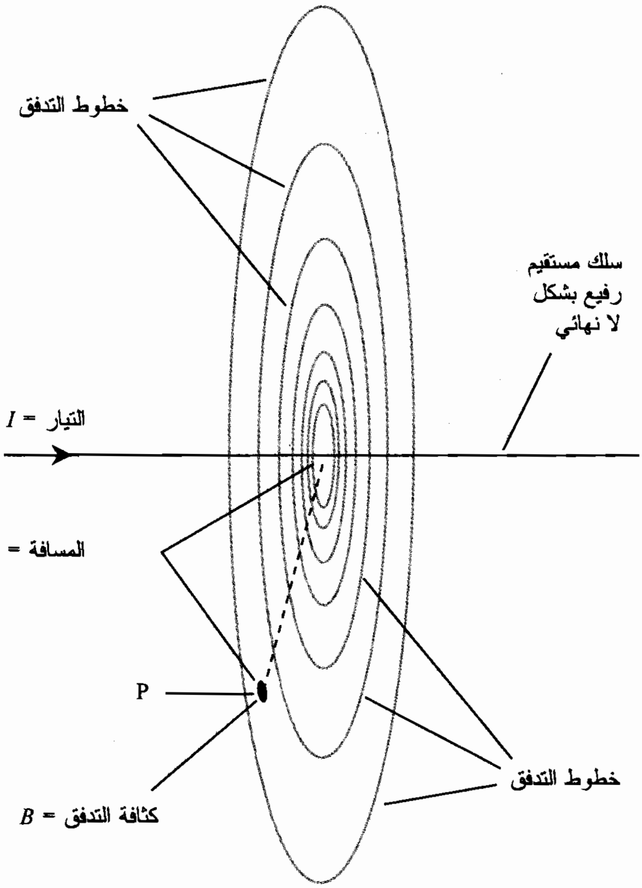
تُستخدم في بعض الأحيان وحدة تدعى *الغيلبيرت* للتعبير عن القوة المحركة المغنطيسية. تساوي هذه الوحدة حوالى 1.256 At. عندما يكون عدد الغيلبيرت معروفاً، اضرب بالعدد 1.256 للتحويل إلى أمبير - لفة. عندما يكون عدد الأمبير - لفة معروفاً، اضرب بالعدد 0.796 للتحويل إلى غيلبيرت.

كثافة التدفق بدلالة التيار

في السلك المستقيم المحاط بالهواء أو بالفضاء الحر (الفراغ) والذي يمر فيه تيار مستمر ثابت، تكون كثافة التدفق أكبر ما يمكن بجانب السلك وتنخفض كلما ابتعدنا عن السلك. قد تتساءل "هل يوجد صيغة تُعبِّر عن كثافة التدفق كتابع للبعد عن السلك"؟ الجواب هو نعم. تكون الصيغة دقيقة في الظروف المثالية كمعظم الصيغ في الفيزياء.

خذ بالاعتبار سلكاً رفيعاً بشكل كبير جداً، ومستقيم تماماً. افترض أن تياراً قيمته I أمبير يمر فيه. دعنا نشير إلى كثافة التدفق (بالتسلا) B. خذ بالاعتبار النقطة P التي تبعد مسافة r (بالمتر) عن السلك، على المسار الأقصر الممكن إلى السلك (أي في مستوى عامودي على السلك). إن ذلك موضح في الشكل (14-3). وبالتالي تُطبَّق الصيغة التالية:

$$B = 2 \times 10^{-7}\ (I/r)$$



الشكل (14-3): تتغيّر كثافة التدفق عكسياً مع البعد عن السلك الحامل للتيار المستمر.

يمكن في هذه الصيغة اعتبار القيمة 2 دقيقة رياضياً لأي عدد مرغوب فيه من الأرقام الهامة.

كلمـــا انخفضت ثخانة السلك مقارنة مع البعد r عن السلك، وكلما كان السلك مستقيماً في جوار الـــنقطة P الـــتي يجري فيها قياس كثافة التدفق، كلما اعتُبرت هذه الصيغة مؤشراً جيداً لما يحدث في الحياة الحقيقية.

مسألة (14-1)

مـــا هـــي كثافة التدفق بالتسلا في نقطة تبعد 20 cm عن سلك رفيع ومستقيم يمر فيه تيار مستمر قيمته 400 mA؟

حل (14-1)

حوِّل جميع القيم إلى وحدات النظام الدولي (SI). ذلك يعني $r = 0.20$ m و $I = 0.400$ A. بمعرفة هذه القيم وتعويضها مباشرة في الصيغة:

$$B = 2 \times 10^{-7}\,(I/r)$$
$$= 2.00 \times 10^{-7}\,(0.400/0.20)$$
$$= 4.0 \times 10^{-7}\ \mathrm{T}$$

مسألة (14–2)

في السيناريو السابق، ما هي كثافة التدفق B_{gauss} (بالغاوص) في النقطة P؟

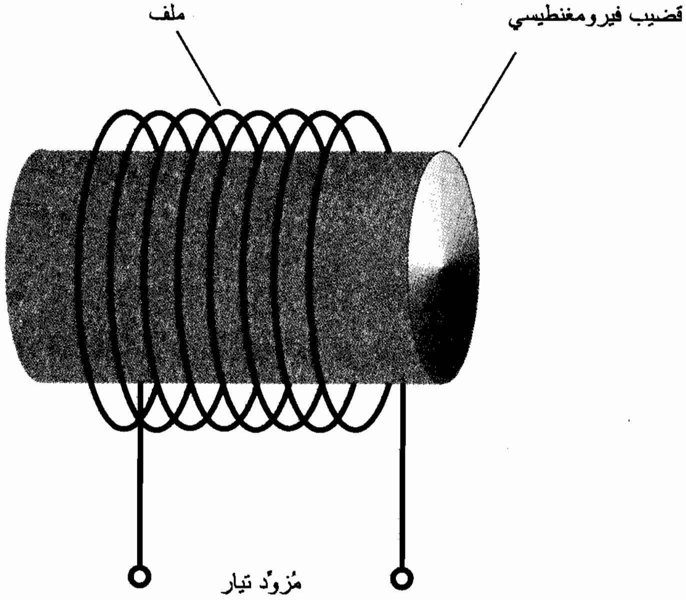
حل (14–2)

لفهم ذلك، يجب أن نُحوِّل من تسلا إلى غاوص. ذلك يعني أنه علينا ضرب جواب المسألة السابقة بالعدد 10^4؛

$$B_{gauss} = 4.0 \times 10^{-7} \times 10^{4}$$
$$= 4.0 \times 10^{-3}\ \mathrm{G}$$

المغانط الكهربائية

يُنـــتج أي تيار كهربائي أو أي حوامل شحنة متحركة حقلاً مغنطيسياً. يمكن أن يصبح هذا الحقل شديداً في ســلك ملفوف بإحكام على شكل ملف بحيث يكون له العديد من اللفات ويمر فيه تيار كهربائي كبير. عند وضــع قــضيب فيرومغنطيسي يُدعى النواة داخل الملف يتركز تدفق الخطوط المغنطيسية في النواة، وتصبح قوة الحقل في النواة وبالقرب من الملف هائلة. ويشكل ذلك مبدأ المغنطيس الكهربائي (الشكل (14–4)).



الشكل (14–4): مغنطيس كهربائي بسيط.

تكون المغانط الكهربائية على شكل اسطواني دائماً تقريباً. تكون الأسطوانة في بعض الأحيان طويلة ورفـيعة؛ وتكون في بعض الحالات الأخرى قصيرة وسميكة. أياً تكن نسبة قطر النواة إلى طوله، يبقى المبدأ نفسه دائماً: يُمغنِط التدفق الناتج عن التيار النواة بشكل مؤقت.

أنماط التيار المستمر

يمكنك بناء مغنطيس كهربائي بواسطة مسمار ملولب كبير من الحديد أو الفولاذ (كمسمار مدفأة) وبلـف مائتي لفة من الأسلاك حوله. تتوفر هذه المُكوِّنات تقريباً في أي مخزن للمعدات. كن متأكداً من أن المسمار الملولب مصنوع من مادة فيرومغنطيسية. (إذا التصق مغنطيس دائم بالمسمار، فإن المسمار الملولب فيرومغنطيسي). مثالياً، يجب أن يكون المسمار بقطر $^3/_8$ إنش على الأقل وبطول عدة إنشات. يجب استخدام سلك معزول أو مطلي، ويفضل أن يكون مصنوعاً من النحاس الطري الصلب. يعمل "سلك الجرس" بشكل جيد.

تأكد من لف جميع اللفات باتجاه واحد. يمكن "لبطارية فانوس" أن تُزوِّد بجهد dc لتشغيل المغنطيس الكهربائـي. لا تصل الملف بالبطارية لأكثر من بضع ثوان. ولا تكرر ذلك، ولا تستخدم بطارية ذات قوة محـركة لهـذه التجربة. يمكن أن تسبب الدارة المقصورة القريبة الناتجة عن مغنطيس كهربائي غليان أسيد البطارية بعنف، وهذا الأسيد عبارة عن مادة خطيرة.

للمغـانط الكهربائية ذات التيار المستمر أقطاب شمالية وجنوبية محددة، تماماً كالمغانط الدائمة. الفرق الرئيسي بينهما هو إمكانية أن يكون المغنطيس الكهربائي أقوى بكثير من أي مغنطيس دائم. يمكننا البرهان عن ذلك إذا نفّذنا التجربة السابقة واستخدمنا مسماراً ملولباً كبيراً بشكل كاف واستخدمنا عدداً كافياً من اللفـات. الفـرق الآخر بين المغنطيس الكهربائي والمغنطيس الدائم هو حقيقة أنه في المغنطيس الكهربائي، يتواجد الحقل المغنطيسي فقط عند مرور التيار في الملف. عند نـزع مُزوِّد القدرة، ينهار الحقل المغنطيسي. في بعـض الحالات، تبقى كمية صغيرة من *المغنطيسية المتبقية* في النواة، ولكنها أضعف بكثير من المغنطيسية المتولدة عند تدفق التيار في الملف.

أنماط التيار المتناوب

ربمـا راودتـك فكرة أنه يمكن صناعة مغنطيس كهربائي أقوى بكثير إذا أدخلنا الأسلاك في مقبس الجـدار بـدلاً من استخدام بطارية فانوس كمُزوِّد تيار. يُعتبر ذلك صحيحاً نظرياً. عملياً، ستحرق الفيوز (الفاصـمة) أو ستقطع الدارة. لا تُجرِّب ذلك. إن الدارات الكهربائية في بعض الأبنية ليست محمية بشكل كـاف، قد تؤدي الدارة المقصورة لحريق خطير. ويمكن أن تتلقى صدمة كهربائية قاتلة من شبكة الكهرباء العامة 117 – V. (قم بهذه التجربة في ذهنك، وأبقِها فيه).

تـستخدم بعض المغانط الكهربائية التيار ac بتردد60 – Hz، حيث "تلتصق" هذه المغانط بالأجسام الفيرومغنطيـسية. تنعكس قطبية الحقل المغنطيسي في كل مرة ينعكس فيها اتجاه التيار؛ يوجد 120 هزة أو

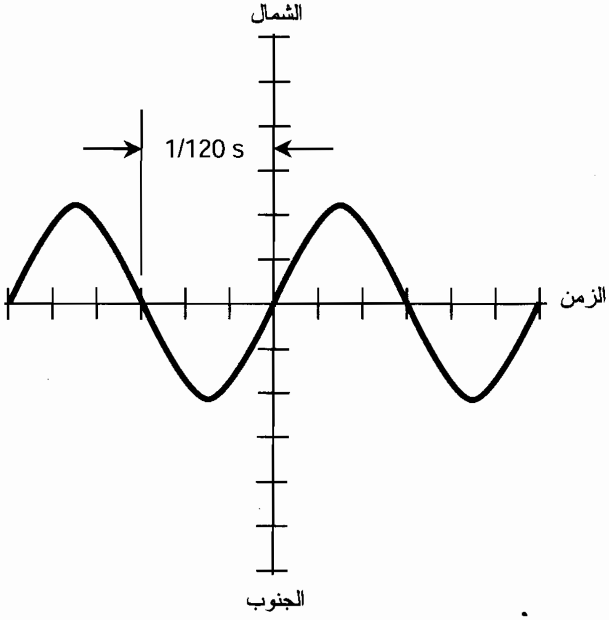
60 تغيّـــراً كاملاً في القطبية شمال - جنوب - شمال، كل ثانية (الشكل (14-5)). إذا وُضع مغنطيس دائم بالقرب من أي "قطب" للمغنطيس الكهربائي ac بحيث يكون له القوة نفسها، لن تنتج عندها أي قوة من المغنطـــيس الكهربائـــي ac بـــسبب تساوي القوى الجاذبة والمتنافرة بين الحقل المغنطيسي المتناوب والحقل الخارجي الثابت. ولكن، توجد قوة جاذبة بين مادة النواة والمغنطيس المجاور الناتج بشكل مستقل عن الحقل المغنطيسي المتناوب الناتج بدوره عن مُزوِّد ac في الملف.

مسألة (14-3)

افتـــرض أن تـــردد ac المُطبَّق على المغنطيس الكهربائي 600 Hz بدلاً من 60 Hz. ماذا سيحدث للتفاعل بين الحقل المغنطيسي المتناوب والمغنطيس الدائم المجاور ذي القوة نفسها؟

حل (14-3)

علـــى افتراض عدم حدوث أي تغيّر في سلوك مادة النواة، سيكون الوضع مماثلاً للحالة التي يكون التردد فيها 60 Hz أو أي تردد ac آخر.



الشكل (14-5): تغيّر القطبية في مغنطيس كهربائي *ac*.

المواد المغنطيسية

تُجمِّع بعض المواد خطوط التدفق المغنطيسي من بعضها بشكل أقرب مما يكون عليه الوضع في الهواء؛ تُـــباعد مـــواد أخـــرى الخطوط عن بعضها بشكل أكبر مما هو عليه في الهواء. النوع الأول من المواد هو الفيرومغنطيسي. إن المواد من هذا النوع، كما ناقشنا سابقاً، "قابلة للمغنطة". وتدعى المواد من النوع الآخر

بالمـــواد اللامغنطيسية. يُعتبر الشمع، والخشب الجاف، والبزموت، والفضة، أمثلة للمواد التي تُخفّض كثافة التدفق المغنطيسي. لا يوجد مادة لا مغنطيسية في أي مكان تُخفّض قوة الحقل المغنطيسي بعامل قريب من العامل الذي تستطيع المواد الفيرومغنطيسية زيادة قوة الحقل المغنطيسي به.

يمكـــن تكمـــيم الخـــصائص المغنطيسية للمادة أو الوسط بطريقتين هامتين ولكن مستقلتين: *النفاذية والمغنطيسية المتبقية*.

النفاذية

ويُرمَـــز لها بالحرف اللاتيني الصغير ميو (μ)، وتقاس بالنسبة إلى الفراغ أو الفضاء الحر. أُسند للفراغ الكامـــل اصـــطلاحاً نفاذية بقيمة 1 تماماً. إذا أُجبر التيار على المرور في حلقة من الأسلاك أو في ملف في الهواء، ستكون كثافة التدفق في الملف وحولها مماثلة لكثافة التدفق في الفراغ. لذلك، فإن النفاذية المغنطيسية للهـــواء النقـــي تـــساوي تقريباً 1. إذا وضعت نواة حديدية في ملف، تزداد كثافة التدفق بعامل يتراوح بين بضع عشرات إلى عدة آلاف المرات، وذلك اعتماداً على نقاوة المعدن. يمكن أن تتراوح نفاذية الحديد مـــن 60 (نفاذيـــة منخفضة في الحديد المُشاب)، إلى حوالى 8,000 (نفاذية مرتفعة في الحديد ذي النقاوة المرتفعة).

إذا اســـتخدمت خلائط معدنية خاصة تدعى *خلائط الإنفاذ* كمادة لنواة المغانط الكهربائية، يمكنك زيـــادة كثافة التدفق وبالتالي زيادة القوة المحلية للحقل بحوالى مليون ضعف (10^6). وبالتالي تبلغ نفاذية هذه المواد 10^6.

إذا شـــعرت لبعض الأسباب بأنك مجبرٌ على صناعة مغنطيس كهربائي ضعيف قدر الإمكان، يمكنك اســـتخدام الخشب الجاف أو الشمع كمادة للنواة. ولكن تُستخدم المواد اللامغنطيسية عادةً للحفاظ على الأجسام المغنطيسية متباعدة لتخفيض التفاعل فيما بينها.

المغنطيسية المتبقية

تبقـــى مواد فيرومغنطيسية معينة ممغنطة بشكل أفضل من غيرها. عند تعرّض مادة كالحديد إلى حقل مغنطيـــسي شـــديد قـــادر علـــى إمساكها، من خلال إحاطتها بملف يمر فيه تيار كبير، ستبقى مغنطيسية متبقـــية عـــندما يتوقف التيار عن المرور في الملف. تدعى المغنطيسية المتبقية في بعض الأحيان *بالقدرة على الاحـــتفاظ*، وهـــي مقـــياس لمدى قدرة المادة على "تذكر" الحقل المغنطيسي المُطبّق عليها وتصبح بالتالي مغنطيساً دائماً.

يجـــري التعبير عن المغنطيسية المتبقية على شكل نسبة مئوية. إذا كانت كثافة التدفق العظمى الممكنة لمادة تساوي x تسلا أو غاوص ثم انخفضت إلى y تسلا أو غاوص عند نـــزع التيار، تُعطى صيغة المغنطيسية المتبقية B_r لتلك المادة بالصيغة:

$$B_r = 100\, y/x$$

مـــاذا عنينا ب*كثافة التدفق العظمى الممكنة* في التعريف السابق؟ إنه سؤال هام جداً. في العالم الحقيقي، إذا صنعت مغنطيساً كهربائياً بنواة، يوجد نهاية لكثافة التدفق التي يمكن توليدها في تلك النواة. بزيادة التيار في الملف، تزداد كثافة التدفق داخل النواة بشكل متناسب – لبرهة. ولكن عند الوصول لنقطة معينة، تستقر كثافة التدفق، ولا تُنتج الزيادة الإضافية في التيار أي زيادة إضافية في كثافة التدفق. تُدعى هذه الحالة *بتشبع النواة*. عندما نحدد المغنطيسية المتبقية لمادة ما، فإننا نرجع لنسبة كثافة التدفق عند الإشباع إلى كثافة التدفق عند عدم وجود قوة محركة مغنطيسية تؤثر عليه.

كمثال، افترض أنه يمكن مغنطة قضيب معدني بمغنطيسية تبلغ 135 G عند إحاطته بملف يمر فيه تيار. تخـــيل أن هذه القيمة تشكل كثافة التدفق العظمى الممكنة التي يمكن أن يتحملها القضيب. يوجد لأي مادة قيمة عظمى كهذه القيمة؛ لن تسبب الزيادة الإضافية في تيار الملف أي زيادة في مغنطيسية القضيب. افترض الآن بأنه تم قطع التيار وبقي 19 G في القضيب. وبالتالي تكون المغنطيسية المتبقيةB_r

$$B_r = 100 \times 19/135 = 100 \times 0.14 = 14\%$$

تكـــون المغنطيـــسية المتبقية جيدة في بعض المواد الفيرومغنطيسية، حيث تُعتبر هذه المواد مواداً ممتازة لـــصناعة المغانط الدائمة. وتكون المغنطيسية المتبقية في بعض المواد الفيرومغنطيسية ضعيفة حيث تعمل هذه المـــواد بـــشكل جيد في نوى المغانط الكهربائية، ولكن لا يُصنع منها مغانط دائمة جيدة. يُفضَّل في بعض الأحـــيان أن يكـــون لدينا مادة بخصائص مغنطيسية جيدة مع مغنطيسية متبقية ضعيفة. نستخدم هذه المادة عـــندما نرغب بأن يكون لدينا مغنطيس كهربائي يعمل بتيار dc، وبالتالي يحافظ على قطبية ثابتة مع فقدان مغنطيسيته عند قطع التيار عنه.

إذا كانـــت المغنطيـــسية المتبقية لمادة فيرومغنطيسية ضعيفة، فمن السهل جعلها تعمل كنواة لمغنطيس كهرباء ac بسبب سهولة تبديل القطبية. ولكن، إذا كانت المغنطيسية المتبقية للمادة الفيرومغنطيسية عالية، تكون المادة "متباطئة مغنطيسياً" ولها مشكلة في متابعة عكس التيار في الملف. لا يعمل هذا النوع من المواد بشكل جيد كنواة لمغنطيس كهربائي ac.

مسألة (14-4)

افترض أن قضيباً معدنياً محاطاً بملف بحيث تكون كثافة التدفق المغنطيسي كبيرة وقيمتها 0.500 T؛ لن تسبب أي زيادات إضافية في التيار زيادة إضافية في كثافة التدفق داخل النواة. ثم تمّ قطع التيار؛ انخفضت كثافة التدفق إلى 500 G. ما هي المغنطيسية المتبقية لمادة النواة هذه؟

حل (14-4)

أولاً، حـــوِّل كـــل من رقمي كثافة التدفق إلى الوحدات نفسها. تذكر أن $1T = 10^4$ G. وبالتالي تكـــون كثافة التدفق $0.500 \times 10^4 = 5{,}000$ G بوجود التيار، و500 G بدون تيار. "بتعويض" هذه الأرقام نحصل على:

$$B_r = 100 \times 500/5{,}000 = 100 \times 0.100 = 10.0\ \%$$

المغانط الدائمة

يمكـــن صـــنع مغنطيس دائم من أي مادة مغنطيسية أو أي مادة يمكن ترتيب ذراقا بشكل دائم. إلها المغـــانط التي لعبت بها عندما كنت صغيراً (والتي ربما لا تزال تلعب بها عندما تستخدمها للصق الملاحظات علـــى بـــاب الـــبراد). يمكن صناعة بعض الخلائط على شكل مغانط دائمة بحيث تكون أقوى من المغانط الأخرى.

تُدعـــى الخليطة المناسبة بشكل خاص لصناعة المغانط الدائمة القوية بالاسم التجاري ألنيكو (Alnico). اشـــتقت هذه الكلمة من الرموز الكيميائية للمعادن التي تضم: الألمنيوم (Al)، والنيكل (Ni) والكوبالت (Co). تُـــضاف بعض المعادن الأخرى أحياناً، متضمنة النحاس والتيتانيوم. ولكن، يمكن مغنطة أي قطعة حديد أو فولاذ إلى حدّ معين. يستخدم الكثير من التقنيين المفكات التي يجري مغنطتها بشكل خفيف بحيث تستطيع حمل البراغي عند فكها أو تثبيتها في الأماكن ذات الوصول الصعب.

تُصنع أفضل المغانط الدائمة من مواد ذات مغنطيسية متبقية عالية. تُصنع هذه المغانط باستخدام هذه المـــادة كنواة لمغنطيس كهربائي لمدة زمنية طويلة. إذا رغبت بمغنطة مفك قليلاً بحيث يستطيع حمل البراغي، مرر عامود المفك برفق (مسِّد) وباتجاه واحد على نهاية مغنطيس مستقيم بضع عشرات من المرات. ولكن، انتبه: حالما تمغنط أداة ما، يستحيل عملياً إزالة مغنطتها بشكل كامل.

كثافة التدفق داخل ملف طويل

افترض أن لديك ملفاً طويلاً، يُشتهر باسم وشيعة، ذا n لفة وطوله s مقدراً بالمتر. افترض أنه يمر في الوشـــيعة تيار قيمته I أمبير وأن لها نواة نفاذيتها المغنطيسية μ. يمكن إيجاد كثافة التدفق داخل النواة بالتسلا B، على افتراض أنها ليست في حالة تشبع، باستخدام الصيغة:

$$B = 4\pi \times 10^{-7} (\mu nI/s)$$

وبتقريب جيد

$$B = 1.2566 \times 10^{-6} (\mu nI/s)$$

مسألة (5-14)

لنفترض أنه يمر تيار مُعيّن في مغنطيس كهربائي dc. طول المغنطيس 20 cm ويحوي 100 لفة. تبلغ كثافة التدفق في النواة التي ليست في حالة تشبع 20 G. تبلغ النفاذية المغنطيسية لمادة النواة 100. ما هو التيار المار في السلك؟

حل (5-14)

ابـــدأ كالعادة بالتأكد من توافق الوحدات مع الصيغة التي ستستخدمها. الطول s هو 20 cm، أي 0.20 m. كثافة التدفق B هي 20 G أي 0.0020 T. أعدْ ترتيب الصيغة السابقة بحيث تتمكن من إيجاد I:

$$B = 1.2566 \times 10^{-6}\ (\mu nI/s)$$
$$B/I = 1.2566 \times 10^{-6}\ (\mu n/s)$$
$$I^{-1} = 1.2566 \times 10^{-6}\ (\mu n/sB)$$
$$I = 7.9580 \times 10^{5}\ (sB/\mu n)$$

إنه تمرين ولكنه واضح. إن اشتقاقات كهذه خاضعة لشرط أن لا نُقسِّم على أي قيمة يمكن أن تبلغ قيمة الصفر في الحالة العملية. (إنها ليست مشكلة هنا. فنحن لا نهتم بالسيناريوهات التي تستلزم تياراً صفرياً أو صفر لفة أو نفاذية مغنطيسية صفراً أو ملفات طولها صفر). دعنا "نعوض الأرقام":

$$I = 7.9580 \times 10^{5}\ (0.20 \times 0.0020)/\ (100 \times 100)$$
$$= 7.9580 \times 10^{5} \times 4.0 \times 10^{-8}$$
$$= 0.031832\ \text{A} = 31.832\ \text{mA}$$

يجب تقريب هذا العدد بالتدوير إلى 32 mA لأننا مطالبون برقمين هامين فقط.

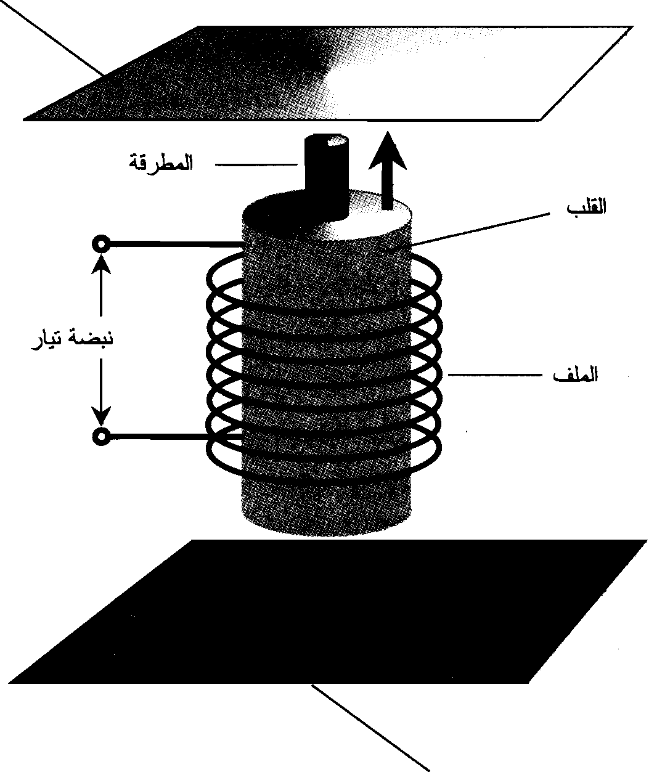
الآلات المغنطيسية

يمكن أن تقوم الوشيعة ذات النواة الفيرومغنطيسية القابلة للحركة بأشياء متنوعة. تُستخدم الريلهات الكهربائية، وأجراس الرنين، و"المطارق" الكهربائية، والأجهزة الميكانيكية الأخرى مبدأ الوشيعة. يمكن استخدام مغانط كهربائية أكثر تعقيداً، بالاشتراك في بعض الأحيان مع المغانط الدائمة، لبناء المحركات، والمقاييس، والمُوَلِّدات، والأجهزة الأخرى.

جهاز الرنان

يوضح الشكل (14-6) مخططاً مُبسّطاً لجرس رنان. إن وشيعته عبارة عن مغنطيس كهربائي. للنواة منطقة مجوفة في المركز، على طول محورها، حيث يمر قضيب فولاذي. يحوي الملف الكثير من اللفات، بحيث يكون المغنطيس الكهربائي قوياً إذا مرّ في الملف تيار كبير.

عندما لا يمر في الملف أي تيار، يكون القضيب مشدوداً للأسفل بقوة الجاذبية. عند مرور نبضة تيار في الملف، يُسحَب القضيب بقوة للأعلى. "تريد" القوة المغنطيسية بلوغ نهايات القضيب الذي يساوي طوله طول النواة، لينتظم مع نهايات النواة. ولكن، تكون النبضة قصيرة، ويُتيح العزم الصاعد تمرير القضيب في كامل الممر في النواة ليضرب صفيحة الرنان. ثم يهبط القضيب الفولاذي للأسفل ثانية إلى موضع الراحة الخاص به، ليسمح للصفيحة بالاهتزاز وإرجاع الصدى. إن بعض هواتف المكاتب مجهزة برنان يُنتج ضجة أكثر من إنتاجه للرنين التقليدي أو الأزيز أو التزمير أو الزقزقة التي تصدرها معظم مجموعات الهاتف. إن صوت "الجرس القرصي" هو أقل إزعاجاً لبعض الناس من إشارات طلب – الانتباه الأخرى.

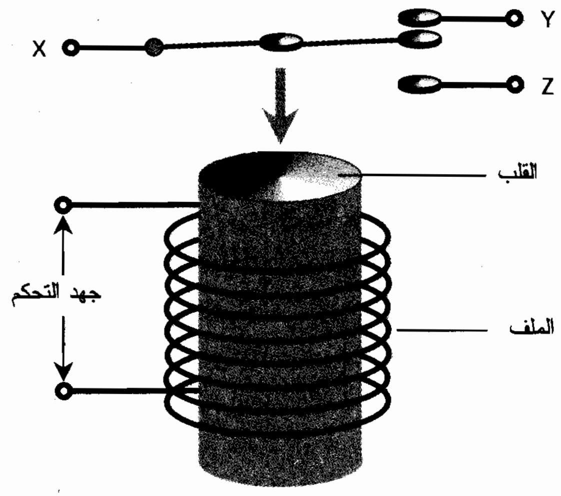


الشكل (14–6): جرس رنان يستخدم وشيعة.

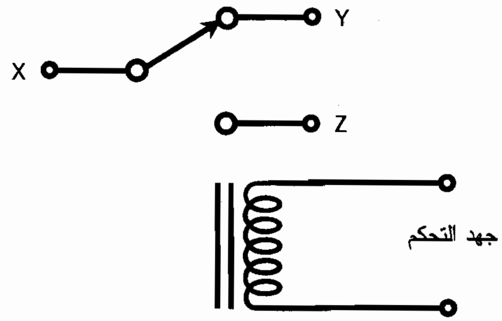
الريلاي

من غير المناسب في بعض الأجهزة الإلكترونية وضع قاطعة (مفتاح تبديل) حيث يجب وضعها تماماً. مثلاً، قد ترغب بتبديل خط الاتصالات من فرع إلى آخر من مسافة بعيدة. في المرسلات اللاسلكية، تحمل بعض الأسلاك تيارات متناوبة عالية التردد، والتي يجب الحفاظ عليها في أجزاء معينة في الدارة، وأن لا يجرِ توجيهها إلى اللوحة الأمامية للتبديل. تسمح *الريلاي* التي تستخدم الوشيعة بإنجاز التبديل المُتحكَّم به عن بعد.

يوضح الشكل (14–7) رسماً ومخططاً للريلاي. تكون الرافعة القابلة للحركة، والتي تدعى *الذراع*، مثبتة في أحد جوانبها بنابض عند عدم مرور تيار في المغنطيس الكهربائي. تحت هذه الشروط، تكون النهاية X موصولة بالنهاية Y وغير موصولة بالنهاية Z. عند تطبيق تيار كاف، يجري شد الذراع للأعلى إلى الجانب المقابل. يفصل ذلك النهاية X عن النهاية Y ويصل النهاية X بالنهاية Z.



(أ)



(ب)

الشكل (14-7): (أ)- رسم تصويري لريلاي بسيطة. (ب)- رمز تخطيطي للريلاي نفسها.

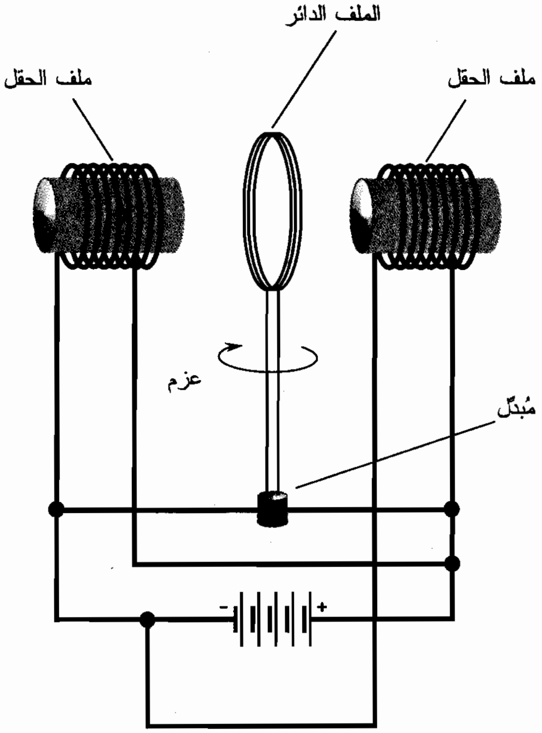
توجد أنواع هائلة من الريليات، يُستخدم كل منها لهدف مختلف. بعضها معد للاستخدام مع التيار المستمر، والبعض الآخر معد للاستخدام مع التيار المتناوب؛ ويعمل بعضها مع dc أو ac. تكمل *الريلاي المغلقة طبيعياً* الدارة عند عدم مرور تيار في مغنطيسها الكهربائي، وتقطع الدارة عند مرور التيار. *الريلاي المفتوحة طبيعياً* هي عكس الريلاي المغلقة طبيعياً تماماً. (يعني *الطبيعي* بهذا المعنى "عدم وجود تيار في الملف"). يمكن استخدام الريلاي الموضحة في الشكل (14-7) كريلاي مغلقة طبيعياً أو مفتوحة طبيعياً وذلك اعتماداً على اختيار التماسات. يمكن استخدامها أيضاً لتبديل الخط بين دارتين مختلفتين.

تستخدم الريليهات هذه الأيام في الدارات والنظم التي تحمل تيارات أو جهود كبيرة. تُفضَّل في معظم التطبيقات العادية القواطع (مفاتيح التبديل) المصنّعة بواسطة أنصاف النواقل الإلكترونية والتي ليس لها أجزاء متحركة والتي تدوم لفترات أطول من الريليات.

محرك التيار المستمر

يمكـــن أن تُنـــتج الحقول المغنطيسية قوى ميكانيكية ضخمة. يمكن إخضاع هذه القوى بحيث تقوم بعمل. تُدعى الآلة التي تُحوِّل طاقة dc إلى طاقة ميكانيكية دوارنية *بمحرك dc*. بهذا المعنى، يكون محرك dc شـــكلاً من *المُبدِّلات*. يمكن أن تكون حجوم المحركات بالغة الصغر ويمكن أن تكون كبيرة بحجم المنـــزل. تُـــستخدم بعض المحركات الصغيرة جداً في الأجهزة الطبية بحيث تستطيع فعلياً الدوران في مجرى الدم، أو يمكن تثبيتها في أعضاءِ الجسم. تستطيع بعض المحركات جر قطار بسرعات كبيرة.

يوصـــل مُزوِّد الكهرباء في محرك dc إلى مجموعة من الملفات التي تُنتج حقولاً مغنطيسية. يجري التبديل بين تجاذب الأقطاب المتعاكسة وتنافر الأقطاب المتماثلة بطريقة ينتج عنها عزم دوران ثابت أو قوة دوارنية ثابتة. كلما ازداد التـــيار المـــار في الملفات، كلما كان العزم أقوى، وكلما كانت الطاقة الكهربائية الضرورية أكبر. تدور مجمـــوعة من الملفات، تدعى *الملف الدائر*، مع عامود المحرك. تبقى مجموعة الملفات الأخرى، وتدعى *ملف الحقـــل*، ثابتة (الشكل (14-8)). تُستبدل ملفات الحقل في بعض المحركات بزوج من المغانط الدائمة. تجري المحافظـــة علـــى اتجاه التيار في ملف الدائر كل نصف دورة بواسطة *المُبدِّل*. يحافظ ذلك على القوة بالاتجاه الزاوي نفسه. يجري حمل المحور بواسطة عزمه الزاوي بحيث لا يتوقف في لحظات تبديل قطبية التيار.



الشكل (14-8): رسم مبسط لمحرك كهربائي *dc*. تمثل الخطوط المستقيمة الأسلاك.
تشير الخطوط المتقاطعة إلى الوصلات فقط عند وجود نقطة في أماكن تقاطع الخطوط.

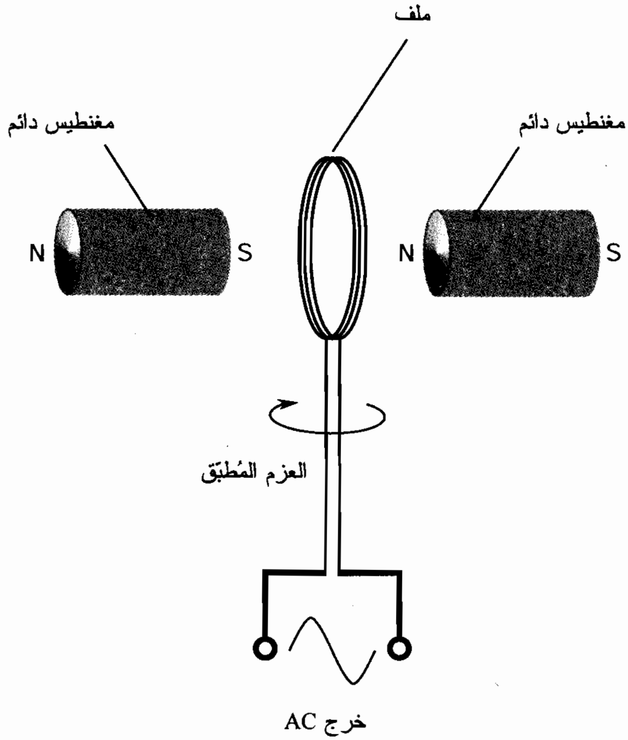
المُوِّلد الكهربائي

يُبنى *المُوِّلد الكهربائي* بشكل مشابه إلى حدّ ما للمحرك التقليدي، على الرغم من أنه يعمل بشكل معاكس. تستطيع بعض المُولِّدات أيضاً أن تعمل كمحركات؛ وتدعى مُوِّلداً/محركاً. إن المُوِّلدات، كالمحركات، عبارة عن مُبدِّلات طاقة من نمط خاص.

ينتج المُوِّلد النموذجي تيار ac عندما يدور الملف بسرعة في حقل مغنطيسي قوي. يمكن تزويد الحقل المغنطيسي بواسطة زوج من المغانط الدائمة (الشكل (14-9)). يُقاد محور الدوران بواسطة محرك يُغذى بالبنزين أو بواسطة تربين أو بواسطة بعض مُزوِّدات الطاقة الميكانيكية الأخرى. يمكن استخدام المُبدِّل مع المُوِّلد لإنتاج خرج على شكل تيار مستمر متذبذب، والذي يمكن فلترته للحصول على dc صافٍ لاستخدامه في التجهيزات الدقيقة.

خزن البيانات مغنطيسياً

يمكن استخدام الحقول المغنطيسية لخزن البيانات بأشكال متنوعة. تتضمن الوسائط العامة لخزن البيانات *الشريط لمغنطيسي والقرص المغنطيسي*.



الشكل (14-9): نوع مُبسّط لمُوِّلد *ac*.

الشريط المغنطيسي

إنّ شريط التسجيل هو مادة تجدها في مُشغِّلات الكاسيت. الشريط المغنطيسي هذه الأيام مهمل بشكل كبير، ولكنه لا يزال يُستخدم في بعض الأحيان في التسلية المنزلية، خاصة في الموسيقى ذات الدقة المتناهية (hi–fi) والفيديو المنزلي. ويمكن إيجاد الشريط المغنطيسي أيضاً في بعض نظم خزن البيانات الكمبيوترية عالية السعة.

يتكون الشريط من ملايين من جزيئات أكسيد الحديد الملتصقة بقطعة معدنية لا فيرومغنطيسية أو بقطعة بلاستيكية. يستقطب الحقل المغنطيسي المتقلب الذي ينتجه *رأس التسجيل* هذه الجزيئات. يؤدي مرور الشريط بسرعة ثابتة مُتحكَّم بها إلى تغيّر قوة الحقل في المنطقة المقابلة لرأس التسجيل. يؤدي ذلك لإنتاج مناطق تكون فيها جزيئات أكسيد الحديد مُستقطَبة باتجاه معين. عندما يجري الشريط بالسرعة نفسها عبر المسجل في نمط الاستعادة، تسبب الحقول المغنطيسية حول الجزيئات الفردية *حقلاً متقلباً* يمكن كشفه بواسطة *رأس التقاط الصوت*. إنّ لهذا الحقل نموذج التغيّرات نفسه للحقل الأصلي الناتج عن رأس التسجيل.

يتوفر رأس التسجيل بعرض وسماكات متنوعة لتناسب التطبيقات المختلفة. لا يجري تشغيل الكاسيتات ذات الشريط السميك بطريقة تشغيل الكاسيتات ذات الشريط الرفيع، ولكن يكون الشريط الأسمك أكثر مقاومة للتمدد. تحدد سرعة الشريط دقة التسجيل. تُفضّل السرعات العالية لتسجيل الموسيقى والفيديو وتُفضّل السرعات المنخفضة لتسجيل الصوت.

يمكن تشويه البيانات الموجودة على الشريط المغنطيسي أو محوها بواسطة حقول مغنطيسية خارجية. لذلك، يجب حماية الأشرطة من حقول كهذه. احتفظ بالشريط المغنطيسي بعيداً عن المغانط الدائمة أو المغانط الكهربائية. قد تؤذي الحرارة المرتفعة أيضاً البيانات الموجودة على الشريط المغنطيسي، وإذا كانت الحرارة مرتفعة كفاية، سيتضرر الشريط الفيزيائي أيضاً.

القرص المغنطيسي

شهد عصر الكمبيوتر الشخصي تطوير نظم لخزن البيانات المدمجة التي لم نشهد لها مثيلاً من قبل. أحد أكثر هذه النظم تعدداً هو القرص المغنطيسي. يمكن أن يكون قرص كهذا صلباً أو مرناً. تتوفر الأقراص بأحجام متنوعة. تخزّن *الأقراص الصلبة* (وتدعى أيضاً *بالسواقات الصلبة*) معظم البيانات وتوجد عموماً داخل وحدات الكمبيوتر. تكون *الأقراص الصغيرة* عادةً بقطر 3.5 إنش (8.9 cm)، ويمكن إدخالها ونزعها من آلات تسجيل/ تشغيل تدعى *محركات الأقراص*.

إن مبدأ القرص المغنطيسي، على مستوى ميكروي، هو نفسه مبدأ الشريط المغنطيسي. ولكن تُخزن بيانات القرص على شكل ثنائي؛ أي توجد طريقتان فقط لمغنطة الجزيئات. وهذا يؤدي إلى خزن كامل تقريباً وخالٍ من الأخطاء. يعمل القرص، على مستوى أكبر، بشكل مختلف عن الشريط بسبب اختلاف هندسته. تنتشر المعلومات على الشريط على مساحة كبيرة وتنتشر بعض بتات البيانات بعيدة عن البتات الأخرى. لا يبتعد بتان موجودان على القرص عن بعضهما مسافة أكبر من قطر القرص. لذلك، يمكن نقل البيانات من وإلى القرص بسرعة أكبر مما هو ممكن على الشريط.

يمكن أن يخزن القرص الصغير النموذجي كمية من المعلومات الرقمية المكافئة لرواية قصيرة. يمكن أن تخزن الأقراص الصغيرة الخاصة عالية - السعة ما يكافئ مئات الروايات الطويلة، أو حتى يمكنها خزن موسوعة كاملة.

يجب اتخاذ التدابير الوقائية المتخذة لحماية الشريط المغنطيسي عند معالجة وخزن الأقراص المغنطيسية عند الضرورة.

امتحان موجز

عد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. الحقل المغنطيسي الأرضي
   (a) يجعل الأرض كمغنطيس نضوي (على شكل نعل فرس) ضخم.
   (b) يمر تماماً من الأقطاب الجغرافية.
   (c) يجعل البوصلة تعمل.
   (d) يجعل المغنطيس الكهربائي يعمل.
2. يُقال عن المادة التي يمكن مغنطتها بشكل دائم بأنها
   (a) مغنطيس.
   (b) مغنطيس كهربائي.
   (c) مغنطيس دائم.
   (d) مادة فيرومغنطيسية.
3. التدفق المغنطيسي حول سلك مستقيم يمر تيار فيه
   (a) يصبح أقوى بزيادة البعد عن السلك.
   (b) يكون أقوى ما يمكن بجوار السلك.
   (c) لا تتغيّر قوته تبعاً للبعد عن السلك.
   (d) يتكون من خطوط مستقيمة موازية للسلك.
4. الغاوص هي وحدة
   (a) لقوة الحقل المغنطيسي الكلية.
   (b) أمبير- لفة.
   (c) كثافة التدفق المغنطيسي.
   (d) القدرة المغنطيسية.
5. إذا احتوى ملف على 10 لفات ومرّ فيه تيار 500 mA، ما هي القوة المحركة المغنطيسية مقدرة بالأمبير- لفة؟

(a) 5,000

(b) 50

(c) 5.0

(d) 0.02

6. أي من التالي لا نلاحظه عموماً في العاصفة المغنطيسية؟

(a) تدفق الجُسيْمات المشحونة خارجةً من الشمس.

(b) تذبذب (تقلب) الحقل المغنطيسي الأرضي.

(c) تمزق نقل القدرة الكهربائية.

(d) تمزق انتشار الموجة الميكروية.

7. المغنطيس الكهربائي ac

(a) سيجذب فقط الأجسام الممغنطة الأخرى.

(b) سيجذب برادة الحديد.

(c) سينفر الأجسام الممغنطة الأخرى.

(d) سيجذب أو ينفر المغانط الدائمة اعتماداً على القطبية.

8. المادة ذات المغنطيسية المتبقية العالية مناسبة جداً لصناعة

(a) مغنطيس كهربائي ac.

(b) مغنطيس كهربائي dc.

(c) وشيعة إلكتروستاتيكية.

(d) مغنطيس دائم.

9. الجهاز الذي يعكس قطبية الحقل المغنطيسي للحفاظ على دوران محرك dc هو

(a) الوشيعة.

(b) الملف الدائر.

(c) المُبدِّل.

(d) ملف الحقل.

10. إن حسنة القرص المغنطيسي، بالمقارنة مع الشريط المغنطيسي، لخزن واسترجاع البيانات هي

(a) استمرار القرص لمدة أطول.

(b) إمكانية خزن واسترجاع البيانات في الأقراص بسرعة أكبر مما هو عليه في الشرائط.

(c) تبدو الأقراص أفضل.

(d) الأقراص أقل تحسساً للحقول المغنطيسية.

الفصل 15

المزيد حول التيار المتناوب

تكـــون العلاقات بين التيار، والجهد، والمقاومة، والاستطاعة بسيطة في دارات dc الكهربائية. ينطبق الأمـــر نفسه على دارات ac إذا كانت هذه الدارات لا تخزن أو تُحرر أي طاقة أثناء سير كل دورة تيار. يُقـــال إن الـــدارة تحـــوي *مُفاعَلة* إذا تم تخزين أو تحرير الطاقة أثناء كل دورة. يمكن أن ينتج ذلك بسبب *التحريض أو السعة* أو كليهما.

التحريض

يُعـــاكس التحريض التيار المتناوب عبر التخزين المؤقت لقسم من الطاقة الكهربائية على شكل حقل مغنطيـــسي. تُدعى المُكوِّنات التي تقوم بذلك *بالمُحرِّضات*. تتكون المُحرِّضات عادةً، ولكن ليس دائماً، من ملفات من الأسلاك.

خاصة التحريض

افتـــرض أن لـــديك سلكاً طوله مليون (10^6) كيلومتر. ماذا يحصل لو حوَّلت هذا السلك إلى حلقة ضـــخمة، ووصلت نهاياتها إلى نهايات بطارية؟ يتدفق التيار في الحلقة، ويُنتج ذلك حقلاً مغنطيسياً. يكون الحقل صغيراً في البداية بسبب تدفق التيار في جزء من الحلقة. يزداد التدفق خلال فترة تبلغ بضع ثوان حتى تُكمـــل حـــوامل الشحنة (الإلكترونات بشكل رئيسي) طريقها في الحلقة. تُخزن كمية من الطاقة في هذا الحقـــل المغنطيسي. إن قدرة الحلقة على خزن الطاقة بهذه الطريقة هي خاصة التحريض، والتي يُرمَز لها في المعادلات بالحرف الكبير المائل L.

المُحرِّضات العملية

لا يمكـــنك بأي شكل عملياً صناعة حلقة محيطها 10^6 km. ولكن يمكن لف سلك بهذا الطول على شـــكل ملـــف. عند القيام بذلك، يزداد التدفق المغنطيسي عدة أضعاف بالنسبة لطول معطى من السلك

مقارنة بالتدفق الناتج عن حلقة ذات لفة واحدة.

بالنسبة لأي ملف، تتضاعف كثافة التدفق المغنطيسي عند وضع نواة فيرومغنطيسية داخله. قد تتذكر ذلك من دراسة المغنطيسية. يتضاعف تأثير الملف بزيادة التدفق المغنطيسي بحيث يصبح أكبر بعدة أضعاف بوجود نواة فيرومغنطيسية مقارنة بوجود نواة هوائية. يعتمد التحريض أيضاً على عدد لفات الملف، وعلى قطر الملف، وعلى الشكل الكلي للملف.

يتناسب تحريض الملف عموماً طرداً مع عدد اللفات، ويتناسب التحريض طرداً مع قطر الملف. يؤثر طول الملف، وعدد اللفات وطول قطر اللفة على التحريض حيث ينخفض التحريض بزيادة طول الملف.

وحدة التحريض

عند وصل المُحرِّض بمُزوِّد dc، يستغرق تدفق التيار وقتاً ليُوطِّد نفسه في كامل المُحرِّض. يتغيّر التيار بمعدل يعتمد على التحريض. كلما كان التحريض أكبر، كلما انخفض معدل تغيّر التيار بالنسبة لجهد dc معين. إن وحدة التحريض هي تعبير عن النسبة بين معدل تغيّر التيار والجهد عبر المُحرِّض. يمثل تحريض 1 هنري (1 H) فرق كمون مقداره 1 فولت (1 V) عبر مُحرِّض ازداد التيار فيه أو انخفض بمقدار 1 أمبير بالثانية (1A/s).

الهنري هو وحدة تحريض كبيرة جداً. نادراً ما سنرى مُحرِّضاً بهذا الحجم، وعلى الرغم من ذلك يرتفع تحريض بعض الصمامات المستخدمة في فلترة مُزوِّد القدرة إلى عدة هنري. يُعبَّر عن التحريض عادةً *بالميلي هنري* (mH) أو *المايكرو هنري* (μH) أو *النانو هنري* (nH). يجب أن تعلم بادئات المضاعفات بشكل واضح جداً من الآن، ولكن في حال نسيتها، $1\ mH = 0.001\ H = 10^{-3}\ H$، و$1\ \mu H = 0.001\ mH = 0.000001\ H = 10^{-6}\ H$ و$1\ nH = 0.001\ \mu H = 0.000000001 H = 10^{-9}\ H$.

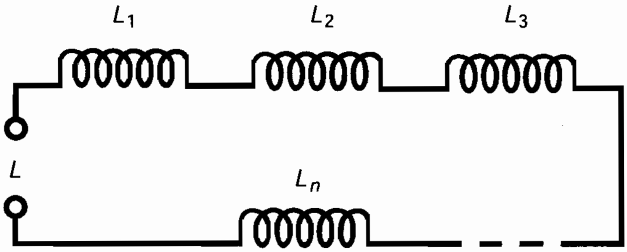
يكون التحريض في الملفات الصغيرة التي تحوي بضع لفات صغيراً، حيث يتغيّر التيار بسرعة وتكون الجهود صغيرة. يكون التحريض في الملفات الضخمة ذات النوى الفيرومغنطيسية والتي تحوي الكثير من اللفات كبيراً، حيث يتغيّر التيار ببطء وتكون الجهود كبيرة.

المُحرِّضات على التسلسل

إذا كانت الحقول المغنطيسية حول المُحرِّضات لا تتفاعل، يُجمع التحريض على التسلسل كما تُجمع المقاومات على التسلسل. تكون القيمة الكلية للتحريض مساوية لمجموع القيم كل على حدة. من المهم التأكد من استخدامك للوحدات بالمقادير نفسها لجميع المُحرِّضات عند جمع قيمها.

افترض أنه لديك التحريضات L_1، L_2، L_3، ...، L_n موصولة على التسلسل (الشكل (15-1)). إذا كانت الحقول المغنطيسية للمُحرِّضات لا تتفاعل -أي عدم وجود تحريض مُتبَادل بين المُكوِّنات - يُعطى التحريض الكلي L بهذه الصيغة

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \ldots + L_n$$

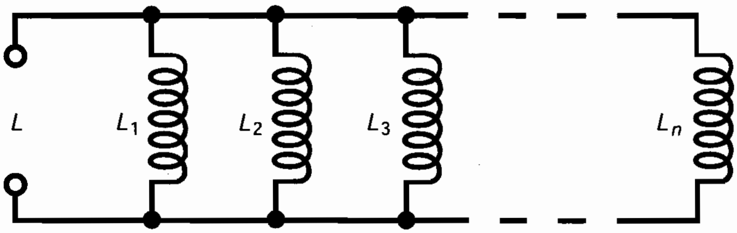


الشكل (15-1): تُضاف التحريضات على التسلسل كما تُضاف المقاومات على التسلسل.

المُحرِّضات على التفرع

إذا لم يتواجد تحريض مُتبَادل بين مُحرِّضين أو أكثر موصولين على التفرع، تُجمع قيم التحريض كما تُجمع قيم المقاومات على التفرع. افترض أنه لديك التحريضات L_1، L_2، L_3، ...، L_n موصولة على التفرع (الشكل (15-2)). إذاً يمكنك إيجاد مقلوب التحريض $1/L$ باستخدام الصيغة التالية:

$$1/L = 1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 + \ldots + 1/L_n$$



الشكل (15-2): تضاف التحريضات على التفرع كما تُضاف المقاومات على التفرع.

يجري إيجاد التحريض الكلي L بأخذ مقلوب العدد الذي حصلت عليه من أجل 1/L. أي:

$$L = 1/(1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 + \ldots + 1/L_n)$$
$$= (1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 + \ldots + 1/L_n)^{-1}$$

وكأنه لدينا تحريضات على التسلسل مرة أخرى، من المهم التذكير بتوافق الوحدات. لا تخلط المايكرو هنري بالميلّي هنري أو الهنري بالنانو هنري. ستكون الوحدات التي تستخدمها لقيم المُكوِّنات كل على حدة هي نفسها الوحدة التي ستحصل عليها للجواب النهائي.

دعنا لا نَشغل أنفسنا بما يحدث عند وجود تحريض مُتبَادل. يزيد التحريض المُتبَادل في بعض الأحيان التحريض الصافي للتركيب إلى قيم أكبر مما تُشير إليه الصيغ، ويُخفِّض التحريض المُتبَادل في بعض الأحيان التحريض الصافي للتركيب. يجب أن يقلق المهندسون في بعض الأحيان بشأن التحريض المُتبَادل عند بناء الراديوهات أو الدارات الإلكترونية المعقدة الأخرى، خاصة ذات الترددات العالية.

مسألة (15-1)

افتـــرض وجود ثلاثة مُحرِّضات موصولة على التسلسل مع عدم وجود تحريض مُتبَادل. إفترض أن قيمها 1.50 mH، و150 µH، و120 µH. ما هو التحريض الصافي للتركيب؟

حل (15-1)

حـــوِّل جميع التحريضات إلى الوحدات نفسها ثم اجمعها. دعنا نستخدم الميلي هنري (mH). يجب ضرب القيمتين الثانية والثالثة بالعدد 0.001 (10^{-3}) لتحويلها من المايكرو هنري إلى الميلي هنري. بالنتيجة، يكون التحريض التسلسلي الصافي:

$$L_s = (1.50 + 0.150 + 0.120)\ \text{mH} = 1.77\ \text{mH}$$

مسألة (15-2)

مـــا هو التحريض الكلي للمُحرِّضات الثلاثة نفسها الموصولة على التفرع، مع الاستمرار بافتراض عدم وجود تحريض مُتبَادل؟

حل (15-2)

حـــوِّل أولاً جميع التحريضات إلى الوحدات نفسها. دعنا نستخدم الميلي هنري مرة أخرى. ثم خذ مقلـــوب هـــذه الأعداد. إن قيمة التحريض الأول 1.50 mH وبالتالي فإن مقلوبه 0.667 mH^{-1}. بشكل مشابه، فإن مقلوب التحريض الثاني والثالث هو 6.667 mH^{-1} و8.333 mH^{-1} بالترتيب. لا تعـــني وحـــدات "مقلـــوب الميلي هنري" الكثير في الحياة الحقيقية، ولكنها مفيدة للحفاظ على مسار ما قمنا به في عملية الحساب. اجمع هذه القيم الآن للحصول على مقلوب التحريض التفرعي الصافي L_p:

$$L_p^{-1} = (0.667 + 6.667 + 8.333)\text{mH}^{-1} = 15.667\ \text{mH}^{-1}$$

أخيراً، احسب المقلوب L_p^{-1} للحصول على L_p:

$$L_p^{-1} = (15.667\ \text{mH}^{-1})^{-1} = 0.0638\ \text{mH}$$

قد يكون من الأفضل التعبير عنه على الشكل 63.8 µH.

المُفاعَلة التحريضية

تُعتبر المقاومة شيئاً بسيطاً في دارات dc. يمكن التعبير عنها بعدد يتدرج من الصفر (الناقل المثالي) إلى قـــيم كبيرة جداً، متزايدة بدون نهاية عبر آلاف، وملايين، وبلايين الأوم. يدعو الفيزيائيون المقاومة *بالكمية الـــسُلمّية* لأنـــه يمكـــن التعبير عنها بواسطة مقياس أحادي - البعد. في الحقيقة يمكن تمثيل المقاومة بنصف مستقيم (يدعى أيضاً شعاعاً).

إذا أُعطـــيت جهد dc معين، نرى أنه يزداد التيار بزيادة المقاومة وفقاً لقانون أوم. ينطبق الأمر نفسه على جهد ac عبر مقاومة إذا جرى تحديد تيار وجهد ac كقيم قمة أو تحديد الجهد من القمة إلى القمة أو rms.

المُحرِّضات وdc

افتـــرض أنه لديك بعض الأسلاك التي تنقل الكهرباء بشكل جيد جداً. إذا قمت بلف السلك على شـــكل ملف ووصلته بمُزوِّد dc، يستجر السلك كمية صغيرة من التيار في البداية، ولكن يصبح التيار كبيراً بسرعة، ومن الممكن أن يحرق الفاصمة (الفيوز) أو يزيد إجهاد البطارية. لا يهم إن كان السلك على شكل حلقة بلفة واحدة، وإن وُضع كيفما اتفق على الأرض أو جرى لفه حول قضيب، لأن التيار كبير. إن هذا التيار يساوي بالأمبير $I = E/R$، حيث يمثل I التيار، ويُمثِّل E جهد dc، وتُمثِّل R مقاومة السلك (مقاومة منخفضة).

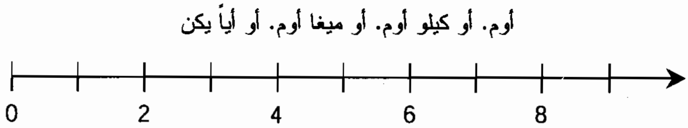
يمكـــنك صـــناعة مغنطيس كهربائي بتمرير dc في ملف ملفوف حول قضيب من الحديد. ولكن، ســـيبقى التيار في الملف ثابتاً وكبيراً. في المغنطيس الكهربائي العملي، يسخن الملف نتيجة الاستطاعة المبددة في سلك المقاومة؛ لا تتحول الطاقة الكهربائية بكاملها إلى حقل مغنطيسي. إذا ازداد جهد البطارية أو جهد مُـــزوِّد القدرة، يسخن سلك الملف، إن كانت النواة حديدية أم لا. أخيراً، إذا استطاع المُزوِّد تسليم التيار الضروري، سينصهر السلك.

المُحرِّضات وac

افترض أنك غيرت مُزوِّد الجهد الموصول بالملف من dc إلى ac. تخيّل أنك تستطيع تغيير تردد ac من بضعة هرتز إلى مئات الهرتز، ثم إلى الكيلو هرتز، ثم إلى الميغا هرتز.

ســـيكون ac في الـــبداية عالـــياً، كما هي الحالة مع dc. ولكن، للملف كمية معينة من التحريض، ويستغرق التيار زمناً صغيراً ليُوطِّد نفسه في الملف. اعتماداً على العدد الموجود من اللفات وعلى نوع النوة إذا كانـــت هواء أو مادة فيرومغنطيسية، ستصل إلى نقطة، يبدأ التحريض في الملف بالتباطؤ عند زيادة تردد ac. أي لن يجد التيار وقتاً ليُوطِّد نفسه في الملف قبل انعكاس القطبية. في ترددات ac العالية، يجد التيار المار في الملـــف صـــعوبة في تتبع الجهد المُطبَّق على الملف. بمجرد أن يبدأ الملف "بالتفكير" بإنشاء دارة مقصورة جيدة، تُمرر موجة جهد ac قمتها، وتعود إلى الصفر، ثم تحاول شد الإلكترونات بالاتجاه الآخر. يشبه هذا التـــباطؤ في الملـــف الـــذي يمر فيه ac، في الحقيقية، مقاومة dc. ويصبح التأثير أكثر وضوحاً. أخيراً، إذا استمرت زيادة تردد مُزوِّد ac، لن يقوم الملف حتى بالاقتراب من توطيد التيار مع كل دورة. سيتصرف إذاً كمقاومة كبيرة. ومن الصعب أن يمر أي تيار فيه.

تدعـــى المقاومة التي يقدمها الملف إلى ac *بالمُفاعَلة التحريضية*. إنها تشبه المقاومة وتُقاس بالأوم (Ω). يمكن أن تتغيّر المُفاعَلة التحريضية كالمقاومة، من قيمة بجوار الصفر (قطعة صغيرة من الأسلاك) إلى قيمة تبلغ عـــدداً مـــن الأوم (ملـــف صغير) إلى قيمة تبلغ عدداً من الكيلو أوم (ملفات أكبر وأكبر أو ملفات بنوى مغنطيـــسية تمر فيها ترددات عالية). يمكن رسم المُفاعَلة التحريضية كشعاع كالمقاومة، كما هو موضح في الشكل (15-3).



الشكل (15-3): يمكن تمثيل المُفاعَلة التحريضية بنصف مستقيم أو شعاع. لا يوجد حدود لكبرها، ولكن لا يمكن أن تكون سالبة.

المُفاعَلة والتردد

تتكون المُفاعَلة التحريضية من نوعين من المُفاعَلة. (سنعالج النوع الثاني قريباً). يُرمَز للمُفاعَلة في العبارات الرياضية بالرمز X. ويشار للمُفاعَلة التحريضية بالرمز X_L.

إذا كان تردد مُزوِّد ac هو f (بالهرتز) وتحريض الملف L (بالهنري)، إذا تكون المُفاعَلة التحريضية X_L (بالأوم)

$$X_L = 2\pi fL \approx 6.2832\, fL$$

تُطبَّق الصيغة نفسها إذا كان التردد f بالكيلو هرتز والتحريض L بالميلي هنري. وتُطبَّق أيضاً إذا كان f بالميغا هرتز وL بالمايكرو هنري. تذكر أنه إذا كان التردد بالآلاف، يجب أن يكون التحريض بمقلوبه من الآلاف، وإذا كان التردد بالملايين، يجب أن يكون التحريض بمقلوبه من الملايين.

تزداد المُفاعَلة التحريضية خطياً بزيادة تردد ac. وهذا يعني أنه عند رسم التابع X_L بدلالة f يكون المنحنى الناتج عبارة عن خط مستقيم. تزداد المُفاعَلة التحريضية أيضاً بزيادة التحريض. لذلك، يظهر التابع X_L بدلالة L أيضاً كخط مستقيم على الرسم. تتناسب قيمة X_L طرداً مع f؛ وتتناسب قيمة X_L طرداً أيضاً مع L؛ رُسمت هذه العلاقات بشكل نسبي في الشكل (15-4).

مسألة (15-3)

مُحرِّض قيمته 10.0 mH. ما هي المُفاعَلة التحريضية عند التردد 100 kHz؟

حل (10-3)

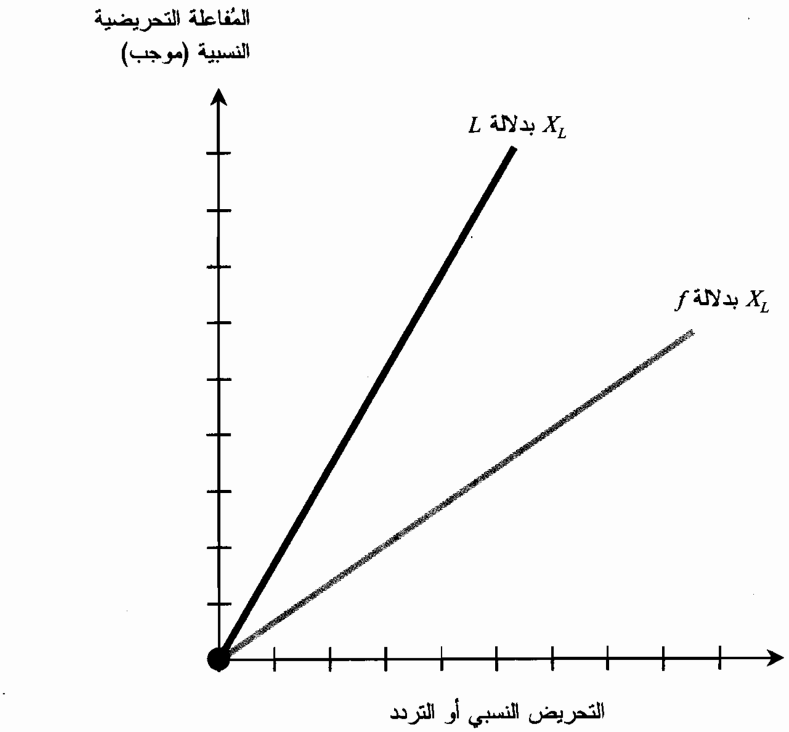
نحن نتعامل بالميلي هنري (جزء من ألف جزء من الهنري) والكيلو هرتز (آلاف الهرتز)، وبالتالي يمكن تطبيق الصيغة السابقة مباشرة. باستخدام العدد 6.2832 كتقريب للعدد 2π، نحصل على

$$X_L = 6.2832 \times 100 \times 10.0 = 6283.2\ \Omega$$

بما أن بيانات الدخل مقدمة بثلاثة أرقام هامة، يجب تقريب هذه النتيجة بالتدوير إلى 6,280 أوم أو 6.28 كيلو أوم (kΩ).

نقاط في ربع المستوى *RL*

تصبح الخصائص ثنائية الأبعاد في دارة تحتوي على مقاومة وتحريض. يمكنك توجيه المقاومة والمُفاعَلة بواسطة نصفي مستقيم متعامدين لإنشاء نظام إحداثيات بربع مستوى، كما هو موضح في الشكل (15-5). المقاومة موضحة على المحور الأفقي، وتُرسم المُفاعَلة التحريضية عامودياً باتجاه الأعلى.

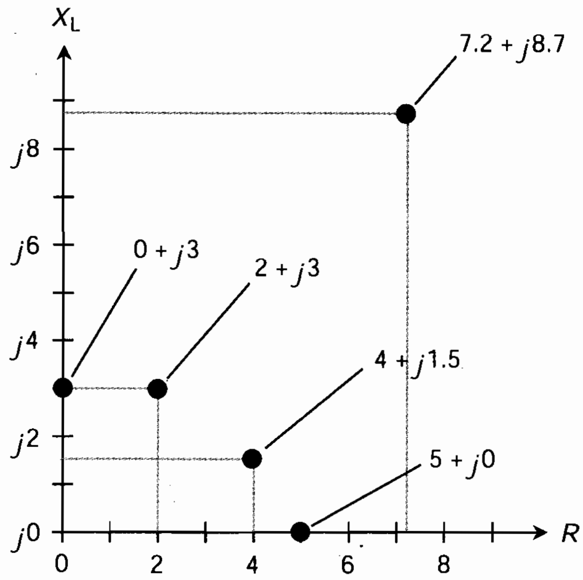


الشكل (15-4): المُفاعلة التحريضية متناسبة طرداً مع التحريض ومتناسبة طرداً مع التردد.

تُوافق كل نقطة في *ربع المستوى RL ممانعة عقدية*. بشكل معاكس، كل قيمة للممانعة العقدية توافق نقطة وحيدة في ربع المستوى. تُكتب الممانعات في ربع المستوى RL على الشكل $R + jX_L$، حيث تُمثّل R المقاومـــة مقدرة بالأوم، وتُمثّل X_L المُفاعَلة التحريضية مقدرة بالأوم، وتُمثّل j وحدة الأعداد التخيلية، أي الجـــذر التربيعـــي الموجب للعدد 1-. تُدعى قيمة j في التطبيقات *بالمُعامل* j. (إذا كنت لا ترتاح للأعداد التخيلية والأعداد العقدية، عد وراجع الفصل الأول من هذا الكتاب).

افتـــرض أنه لديك مقاومة صرفة، ولنقل $R = 5$ أوم. إذاً تكون الممانعة العقدية $5 + j0$ وهي تُمثّل الـــنقطة (5,0) في ربع المستوى RL. إذا كان لديك مُفاعَلة تحريضية صرفة بحيث تكون $X_L = 3$ أوم فإن العـــدد العقدي للمقاومة هو $0 + 3j$، وهي تُمثّل النقطة (0,3) في ربع المستوى RL. يوضح الشكل (15-5) هذه النقاط ويوضح بعض النقاط الأخرى.

في الحـــياة الحقيقية، يكون لجميع المُحرِّضات التي تكون على شكل ملف بعض المقاومة لأنه لا يوجد سلك يُعتبر ناقلاً مثالياً. ولجميع المقاومات مُفاعَلة تحريضية صغيرة لأن لها نهايات سلكية في كل نهاية يكون لها طول فيزيائي قابل للقياس. لا يوجد شيء كالمقاومة الصرفة المثالية رياضياً مثل $5 + j0$، أو مفاعله صرفة مثالـــية رياضياً مثل $0 + 3j$. قد تكون القيم في بعض الأحيان قريبة من هذه القيم المثالية، ولكن لا وجود للمقاومات أو المُفاعَلات الصرفة بشكل مطلق (باستثناء مسائل الامتحانات الموجزة والاختبارات بالطبع!).



الشكل (15–5): خمس نقاط لممانعات عقدية خاصة موضحة في ربع المستوى *RL*.

تُـدمج المقاومة والمُفاعَلة التحريضية في بعض الأحيان بشكل متعمد في الدارات الإلكترونية. وبالتالي يجري الحصول على قيم ممانعة مثل $2 + j3$ أو $4 + j1.5$.

تذكر أن قيم X_L هي للمُفاعَلات (ويُعبَّر عنها بالأوم) وليست مُحرِّضات (والتي يُعبَّر عنها بالهنري). تتغيّر المُفاعَلات بتغيّر التردد في دارة *RC*. إن تغيير التردد يؤدي لنقل النقاط (تحريكها) في ربع المستوى *RL* . تنتقل هذه النقاط عامودياً للأعلى بزيادة تردد ac، وللأسفل بانخفاض تردد ac. إذا انخفض تردد ac إلى الصفر، أي يصبح dc، لاختفاء المُفاعَلة التحريضية. بالنتيجة تصبح $X_L = 0$، وتصبح النقطة على محور المقاومة في ربع المستوى *RL*.

السعة

تمنع السعة تدفق حوامل الشحنة في ac عبر الخزن المؤقت للطاقة على شكل كهربائي. يُعاد تقديم هذه الطاقة لاحقاً. لا تُعتبر السعة هامةً في دارات dc الصرفة، ولكن يمكن أن تكون لها أهمية عندما يتذبذب dc، وعندما لا يكون مستقراً. يمكن أن تظهر السعة، كالتحريض، عندما لا تكون مرغوبةً أو مقصودةً. تصبح التأثيرات السَعَوِيّة أكثر وضوحاً بزيادة التردد.

خاصة السعة

تخيل صفيحتين معدنيتين مستويتين ضخمتين على شكل ناقلين كهربائيين ممتازين. افترض أن حجم كل منهما بحجم ولاية نيبراسكا، وأنه تم وضعهما فوق بعضهما بحيث يفصل بينهما بضعة سنتيمترات من

الهــواء. إذا وُصــلَت هاتان الصفيحتان إلى نهايات بطارية، ستصبحان مشحونتين، إحداهما بشحنة موجبة والأخرى بشحنة سالبة. سيستغرق ذلك بعضاً من الوقت لأن الصفيحتين كبيرتان جداً.

إذا كــان اللبوســان صــغيرين، سيُشحن كلاهما آنياً تقريباً، ليبلغ فرق الكمون قيمة مساوية لجهد الــبطارية. ولكن، وبما أن اللبوسين هائلان، يستغرق "ملء" اللبوس بالإلكترونات بعض الوقت، ويستغرق "خروج" الإلكترونات من اللبوس الموجب بعض الوقت أيضاً.

أخــيراً، يصبح فرق الكمون بين اللبوسين مساوياً لجهد البطارية، ويتواجد حقل كهربائي في الفضاء بــين اللبوســين. يكون هذا الحقل الكهربائي صغيراً في البداية؛ لأن اللبوسين لم يُشحنا حتى الآن. ولكن، يــزداد الحقل خلال فترة من الزمن، اعتماداً على حجم اللبوسين، وعلى البعد بينهما. تُخزن الطاقة في هذا الحقــل الكهربائــي. السعة هي بيان لقدرة اللبوسين، والبعد الفاصل بينهما، على خزن هذه الطاقة. يُرمَز للسعة في الصيغ بالحرف المائل الكبير C.

المُكثِّفات العملية

يــستحيل إنشاء مُكثِّف بالأبعاد السابقة. ولكن يمكن وضع صفيحتين أو رقاقتين معدنيتين إحداهما فوق الأخرى أو مفصولتين بصفيحة رفيعة غير ناقلة كالورق، ويمكن لف المجموع الكلي بحيث نحصل على مساحة أكبر للسطح الفعّال. عند تنفيذ ذلك، يصبح التدفق الكهربائي كبيراً كفاية بحيث يُظهر الجهاز سعة كــبيرة. يمكن وصل مجموعتين مُكوَّنتين من بضع صفائح مع بعضهما، ويفصل الهواء بينهما، وتكون السعة الناتجة كبيرة في ترددات ac العالية.

يتضاعف تركيز التدفق الكهربائي في المُكثِّف عند وضع *عازل كهربائي* من نوع معين بين اللبوسين. تعمــل بعــض أنواع البلاستيك بشكل جيد لتحقيق هذا الهدف. يزيد العازل الكهربائي مساحة السطح الفعــال للّبوسين بحيث يستطيع مُكوِّن صغير فيزيائي أن يمتلك سعة كبيرة. تتناسب السعة طرداً مع مساحة السطح المشترك للبوسين. وتتناسب السعة عكسياً مع البعد الفاصل بين الصفائح الناقلة؛ كلما ازداد القرب بــين اللبوســين كلما ازدادت السعة. تعتمد السعة أيضاً على *ثابت العازلية* للمادة الفاصلة بين اللبوسين. يكافــئ هــذا الثابت الكهربائي ثابت النفاذية المغنطيسية. يساوي ثابت العازلية للفراغ 1. وثابت العازلية للهــواء الجاف هو نفسه ثابت العازلية للفراغ. لبعض المواد ثوابت عازلية عالية تُضاعف السعة الفعالة عدة مرات.

نظــرياً، إذا كان ثابت العازلية للمادة يساوي x، فبالتالي سيزيد وضع هذه المادة بين لبوسي المُكثِّف الــسعة بعامل x مقارنة بالسعة عند وجود الهواء الجاف أو وجود الفراغ بين اللبوسين. يُعتبر ذلك صحيحاً عملياً إذا كان العازل الكهربائي فعالاً مائة بالمائة – أي إذا لم يُحوِّل العازل بين اللبوسين أي طاقة محتواة في الحقــل الكهربائي إلى حرارة. وذلك صحيح أيضاً إذا كانت جميع الخطوط الكهربائية للتدفق بين اللبوسين مجــبرة على المرور من خلال المادة العازلة. إنها سيناريوهات مثالية، وبينما لا يمكن بلوغها مطلقاً، تقترب الكثير من المُكثِّفات الصناعية من الحالة المثالية.

وحدة السعة

عند وصل بطارية بلبوسي مُكثِّف، يستغرق بلوغ الحقل الكهربائي شدته الكاملة بعض الوقت. يتزايد الجهد بمعدل يعتمد على السعة. كلما ازدادت السعة، كلما انخفض معدل تغيّر الجهد بين اللبوسين.

إن وحدة السعة هي تعبير عن النسبة بين كمية التيار المتدفق ومعدل تغيّر الجهد عبر لبوسي المُكثِّف. تمثل السعة 1 *فاراد*، واختصارها F، تدفق تيار قيمته 1 أمبير (1 A) مع وجود زيادة أو نقصان في فرق الكمون مقدار 1 فولت بالثانية (1 V/s). تنتج السعة 1 F أيضاً من فرق كمون مقداره 1 فولت (1 V) لشحنة كهربائية مقدارها 1 كولون (1 C).

الفاراد هو وحدة سعة هائلة. لن ترى أبداً سعة بقيمة 1 F. إن وحدات السعة الأكثر توظيفاً هي *المايكرو فاراد* (μF) *والبيكو فاراد* (pF). إن سعة 1 μF تُمثّل 0.000001 (10^{-6}) F، وسعة 1 pF تُمثّل 0.000001 μF أو 10^{-12} F.

المُكثِّفات على التسلسل

من النادر وجود تفاعل مُتبَادل كبير بين المُكثِّفات. ولكن في ترددات ac العالية جداً، يمكن في بعض الأحيان أن تشكل السعة ما بين *الإلكترودات* مشكلة للمهندسين. يكون هذا التأثير، والذي يظهر كسعة طفيفة ملازمة للأسلاك المتجاورة والموازية لبعضها البعض، دائماً تقريباً غير مرغوب في الدارات العملية.

تُجمع المُكثِّفات على التسلسل مع بعضها كما تُجمع المقاومات أو المُحرِّضات على التفرع. إذا وُصل مكثفان لهما القيمة نفسها على التسلسل، تكون سعة المُكثِّف الناتج مساوية لنصف سعة كل مُكوِّن على حدة. عموماً، إذا وُجدت عدة مُكثِّفات موصولة على التسلسل، فإن القيمة المُركبة تكون أقل من قيمة أي مُكوِّن على حدة. من المهم الاستخدام الدائم للوحدات بالحجم نفسه عند تحديد سعة أي تركيب. لا تخلط المايكرو فاراد بالبيكو فاراد. سيكون الجواب بالوحدة المستخدمة لكل مُكوِّن كل على حدة.

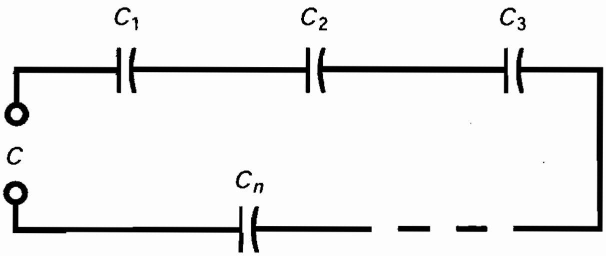
افترض أنه لديك عدة مُكثِّفات ذات قيم C_1، C_2، C_3، ...، C_n موصولة على التسلسل (الشكل (6-15)). يمكنك إيجاد مقلوب السعة الكلية $1/C$ باستخدام الصيغة التالية:

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \ldots + 1/C_n$$

يجري إيجاد السعة الكلية C بأخذ مقلوب العدد $1/C$ الذي حصلت عليه.

مسألة (4-15)

تم وصل مُكثِّفين قيمتاهما $C_1 = 0.10$ μF و$C_2 = 0.050$ μF على التسلسل. ما هي السعة الكلية؟



الشكل (15-6): تُجمع السعات على التسلسل كما تُجمع المقاومات والمُحرِّضات على التفرع.

حل (15-4)

أوجد باستخدام الصيغة السابقة مقلوب القيمتين. وهي $1/C_1 = 10\ \mu F^{-1}$ و$1/C_2 = 20\ \mu F^{-1}$. (ليس "لمقلوب المايكرو فاراد" أي معنى عملي ولكن يساعدنا استخدامه على تذكر وجوب أخذ مقلوب مجموع الأعداد قبل حساب السعة). بالنتيجة

$$1/C = 10\mu F^{-1} + 20\mu F^{-1} = 30\ \mu F^{-1}$$

$$C = 1/30\mu F^{-1} = 0.033\ \mu F$$

مسألة (15-5)

تم وصل مُكثِّفين قيمتاهما $0.0010\ \mu F$ و$100\ pF$ على التسلسل. ما هي السعة الكلية؟

حل (15-5):

حوِّل القيم إلى الوحدات نفسها. القيمة $100\ pF$ تُمثّل $0.000100\ \mu F$. إذاً يمكنك القول إن $C_1=0.0010\ \mu F$ و$C_2=0.000100\ \mu F$. إن مقلوب القيمتين هو $1/C_1=1000\ \mu F^{-1}$ و$1/C_2=10{,}000\ \mu F^{-1}$. بالنتيجة:

$$1/C=1000\mu F^{-1} + 10{,}000\ \mu F^{-1}= 11{,}000\ \mu F^{-1}$$

$$C=0.000091\ \mu F$$

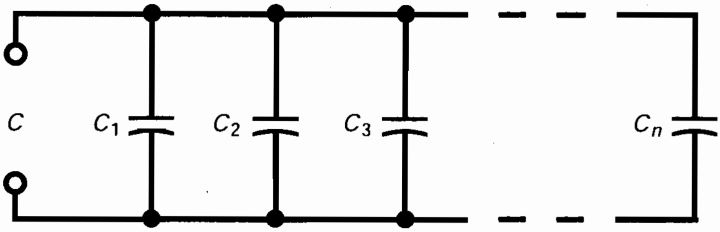
إن هذا العدد صعب قليلاً، وربما تفضل القول إنه $91\ pF$.

أمكنك في المسألة السابقة اختيار العمل بالبيكو فاراد بدلاً من العمل بالمايكرو فاراد. يستلزم ذلك في كلتا الحالتين، حالة عشرية دقيقة بعض الشيء. عندما تكون الأعداد بهذا الشكل من المهم عندها مضاعفة تدقيق الحسابات. ستهتم الآلات الحاسبة بمسألة الحالة العشرية، في بعض الأحيان باستخدام التدوين الأسي، وفي أحيان أخرى بعدم استخدامه، ولكن تستطيع الآلة الحاسبة العمل فقط بالحالة الذي تضبطها عليها. إذا أدخلت عدداً خاطئاً ستحصل على جواب خاطئ، وإذا نسيت رقماً، ستكون قد خفّضت القيمة بعامل مقداره 10 (مرتبة واحدة).

المُكثِّفات على التفرع

تُجمع المُكثّفات على التفرع كما تُجمع المقاومات والتحريضات على التسلسل (الشكل (15-7)).

أي، تكـــون الـــسعة الكلـــية مساوية لمجموع قيم المُكوِّنات كل على حدة. مرة أخرى، تحتاج للتأكد من استخدام وحدات بالحجم نفسه في المسألة بكاملها.



الشكل (15-7): تُجمع المُكثِّفات على التفرع كما تُجمع المقاومات والتحريضات على التسلسل.

مسألة (15-6)

تم وصـــل ثـــلاث مُكـــثِّفات علـــى التفـــرع، وقيمها C_1=0.100 μF، وC_2=0.0100 μF، و C_3=0.00100 μF. ماذا تساوي السعة الكلية C؟

حل (15-6)

اجمعهـــا C=0.100 μF+ 0.0100 μF+ 0.00100 μF= 0.11100 μF. يجب كتابة النتيجة على الشكل C = 0.111 μF، لأن القيم معطاة بثلاثة أرقام هامة.

المُفاعَلة السعوية

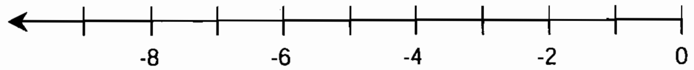
للمُفاعَلـــة التحريضية نظير على شكل *مُفاعَلة سعوية*. يمكن تمثيل المُفاعَلة السعوية أيضاً كشعاع يبدأ من نقطة الصفر نفسها التي تبدأ منها المُفاعَلة التحريضية ولكن ينطلق الشعاع بالاتجاه المعاكس لتكون قيمه الأومـــية سالبة (الشكل (15-8)). عند وصل شعاع المُفاعَلة السعوية مع شعاع المُفاعَلة التحريضية، ينتج مستقيم الأعداد الحقيقية كاملاً، بقيم أومية تتدرج من أعداد سالبة كبيرة إلى الصفر، ومنه إلى أعداد موجبة كبيرة.

المُكثِّفات و dc

تخـــيل صـــفيحتين معدنيـــتين متوازيتين كبيرتين، كما شرحنا سابقاً. إذا وصلتهما بمُزوِّد dc، فإنهما ستستجران كمية كبيرة من التيار في البداية حتى تصبحا مشحونتين كهربائياً. ولكن، عند بلوغ الصفيحتين التوازن، ينخفض هذا التيار، وعندما تصل الصفيحتان إلى فرق الكمون نفسه، يصبح التيار صفراً.

إذا ازداد جهـــد البطارية أو جهد مُزوِّد القدرة، نصل إلى نقطة تقفز فيها الشرارات بين الصفيحتين. أخـــيراً، إذا كـــان مُزوِّد القدرة يستطيع توصيل الجهد الضروري، يصبح هذا الشرر أو القوس الكهربائي مـــستمراً. ثم لن يعمل زوج الصفائح هذا كمُكثِّف. عندما يكون الجهد عبر المُكثِّف كبيراً جداً، لن يعمل العازل الكهربائي (أياً يكن) بشكل صحيح. تُعرف هذه الحالة بحالة *انهيار العازل الكهربائي*.

أوم، كيلو أوم، ميغا أوم، أو أياً يكن



الشكل (15-8): يمكن تمثيل المُفاعلَة السعوية بنصف مستقيم أو شعاع. لا يوجد نهاية لمقدار كبر السالبية، ولكن لا يمكن أن تكون المُفاعلَة السعوية ذات قيمة موجبة أبداً.

في المُكثّفات التي يكون العازل الكهربائي فيها الهواء أو الخلاء، يكون انهيار العازل الكهربائي مسألة مؤقتة؛ ولا يسبب ضرراً دائماً. يعمل الجهاز بشكلٍ طبيعي عند انخفاض الجهد، ويتوقف القوس الكهربائي. ولكــن، يمكــن لانهيار العازل الكهربائي في المُكثّفات ذات العازل الكهربائي الصلب كالميكا أو الورق أو التنتالــيوم أن يحــرق أو يكسر العازل، مسبباً نقل المُكوِّن للتيار حتى بعد انخفاض الجهد تحت جهد العتبة اللازم لحدوث القوس الكهربائي. يُدمَّر المُكوِّن في هذه الحالات.

المُكثّفات و ac

افترض أنه تم تغيير مُزوِّد القدرة الموصول بالمُكثّف من dc إلى ac. تخيّل أنه يمكنك تغيير تردد ac من قــيمة ابتدائية منخفضة تبلغ عدة هرتزات إلى قيمة تبلغ مئات الهرتز، ثم عدة كيلو هرتز، وفي النهاية عدة جيغا هرتز.

في البداية، يتبع الجهد بين الصفائح جهد مُزوِّد القدرة مع الانعكاس المتكرر القطبية للمُزوِّد. ولكن، لمجمــوعة الصفائح كمية معينة من السعة. يمكن شحن الصفائح بسرعة إذا كانت صغيرة وإذا كان الفراغ بيــنهم كــبيراً، ولكـــن لا يمكن شحنهم آنياً. بزيادتك لتردد مُزوِّد ac تصل إلى نقطة لا يجر فيها شحن الـــصفائح كثيراً قبل تغيّر قطبية المُزوِّد. تصبح مجموعة الصفائح بطيئة. لا تملك الشحنة وقتاً لتتوطد مع كل دورة.

في ترددات ac العالية، يعاني الجهد بين الصفائح من مشكلة تتبع التيار الذي يقوم بالشحن والتفريغ. حالما تبدأ الصفائح بالحصول على شحنة جيدة، يُمرر التيار قمته ويبدأ بالتفريغ، ليسحب الإلكترونات من الـــصفيحة الـــسالبة ويضُخها في الصفيحة الموجبة. بارتفاع التردد، تبدأ مجموعة الصفائح بالتصرف أكثر وأكثـــر كدارة مقصورة. أخيراً إذا استمرت زيادة التردد، يصبح دور الموجة أقصر بكثير من زمن شحن-تفـــريغ المُكـــثّف، ويمر التيار إلى الصفائح ومنها بالطريقة نفسها التي كان سيمر بها لو كانت الصفيحتان مقصورتين.

المُفاعَلـــة الـــسعوية هي مقياس كمي للمعارضة التي تقدمها مجموعة الصفائح للتيار المتناوب. تُقاس المفاعلة السعوية بالأوم، تماماً كالمُفاعَلة التحريضية والمقاومة. ولكن، يُسند لها اصطلاحاً قيم سالبة بدلاً من إســـناد قيم موجبة. يمكن أن تتغيّر قيمة المفاعلة السعوية، والتي يُشار لها في الصيغ الرياضية بالرمز X_C، من قـــيمة قـــريبة من الصفر (عندما تكون الصفائح ضخمة وقريبة من بعضها البعض و/أو عندما يكون التردد مرتفعاً جداً) إلى قيم تبلغ عدداً سالباً من الأوم إلى عدد كبير سالب من الكيلو أوم أو من الميغا أوم.

تتغير المُفاعَلة السعوية بتغيّر التردد. تصبح المُفاعَلة السعوية ذات سالبية أكبر بانخفاض التردد، وذات سالبية أصغر بزيادة التردد. إن ما يحدث في حالة المُفاعَلة السعوية معاكس لما يحدث في حالة المُفاعَلة التحريضية، والتي تصبح (موجبة) أكبر بزيادة التردد. يُعبَّر في بعض الأحيان عن المُفاعَلة السعوية بدلالة قيمتها المطلقة من خلال نزع إشارة الطرح. وبالتالي ستقول إن X_C تزداد بانخفاض التردد أو أن X_C تنخفض بزيادة التردد. ولكن، من الأفضل أن تتعلم العمل بقيم X_C السالبة منذ البداية.

المُفاعَلة والتردد

تتصرف المُفاعَلة السعوية بعدة طرق كصورة مرآة للمُفاعَلة السعوية. بمعنى آخر، فإن X_C هي امتداد X_L إلى القيم السالبة - الأصغر من الصفر- مع مجموعة الخصائص الخاصة بها.

إذا أُعطي تردد مُزوِّد الجهد f بالهرتز وأعطيت سعة المُكثِّف C بالفاراد، بالنتيجة تكون المُفاعَلة السعوية

$$X_C = -1/(2\pi fC) = -(2\pi fC)^{-1} \approx -(6.2832fC)^{-1}$$

تُطبَّق الصيغة نفسها إذا كان التردد بالميغا هرتز (MHz) والسعة بالميكروفاراد (μF). تذكر أنه إذا كان التردد بالملايين، يجب أن تكون السعة أجزاء من مليون جزء. ستُطبَّق الصيغة أيضاً على الترددات المقدرة بالكيلو هرتز (kHz) والميلي فاراد (mF)، ولكن ولبعض الأسباب، قد لا ترى أبداً الميلي فاراد مستخدماً عملياً. إن الميلي فاراد وحدة سعة كبيرة؛ نادراً ما توجد مُكثِّفات سعاتها أكبر من 1,000 μF في النظم الكهربائية الموجودة في العالم الحقيقي.

تتغير المُفاعَلة السعوية عكسياً مع التردد. وهذا يعني أنه إذا رسمت X_C كتابع للتردد f سيظهر كمنحنى، وأن هذا المنحنى "يسعى للانهاية السالبة" عندما يكون التردد بجوار الصفر. يظهر منحنى X_C كتابع للسعة C وكأن هذا المنحنى "يسعى للانهاية السالبة" عند اقتراب السعة من الصفر. تتناسب X_C السالبة عكسياً مع التردد وكذلك مع السعة. يوضح الشكل (15-9) المنحنيات النسبية لهذه التوابع.

مسألة (15-7)

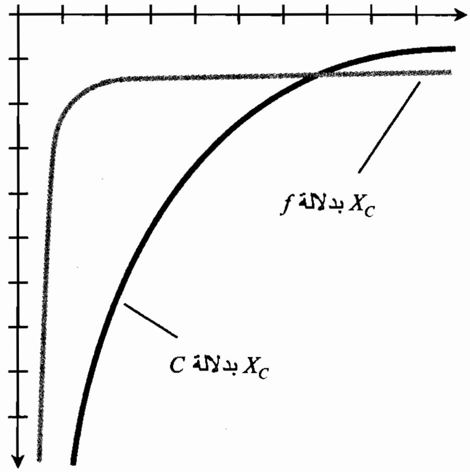
مُكثِّف قيمته 0.00100 μF عند التردد 1.00 MHz. ما هي المُفاعَلة السعوية؟

حل (15-7)

استخدم الصيغة وعوِّض الأعداد. يمكنك القيام بذلك مباشرة لأن البيانات محددة بالميكروفاراد (أجزاء من مليون جزء من الفاراد) والميغا هرتز (ملايين):

$$X_C = -1/(6.2832 \times 1.00 \times 0.00100) = -1/(0.0062832) = -159\ \Omega$$

جرى تقريب هذا العدد بالتدوير إلى ثلاثة أرقام هامة لأن البيانات مقدمة بثلاثة أرقام فقط.



الشكل (15-9): تتناسب المُفاعلة السعوية عكسياً مع السعة السالبة، وعكسياً مع التردد السالب.

مسألة (15-8)

كم ستكون المُفاعلة السعوية للمُكثّف السابق إذا انخفض التردد إلى الصفر؛ أي إذا أصبح مُزوِّد الجهد مُزوِّد dc؟

حل (15-8)

في هذه الحالة، إذا عوضت الأعداد في الصيغة، ستحصل على صفر في المقام (المخرج). القسمة على صفر غير مُعرّفة. ولكن، في الحقيقة، لا يوجد شيء يمنعك من وصل بطارية dc بالمُكثّف! قد تقول "إن المُفاعَلة ذات قيمة سالبة كبيرة جداً، وتساوي في جميع الأهداف العملية، اللانهاية السالبة". بشكل مناسب أكثر، يجب أن تقول إن المُكثّف هو دارة dc مفتوحة.

مسألة (15-9)

افترض أن مُفاعَلة مُكثّف تساوي 100- أوم عند التردد MHz 10.0. ما هي السعة؟

حل (15-9)

نحتاج في هذه المسألة لتعويض الأعداد في الصيغة، وإجراء الحل لإيجاد قيمة C المجهولة. ابدأ بهذه المعادلة:

$$-100 = -(6.2832 \times 10.0 \times C)^{-1}$$

بالتقسيم على 100-:

$$1 = (628.32 \times 10.0 \times C)^{-1}$$

بضرب كل طرف بالسعة C:

$$C = (628.32 \times 10.0)^{-1}$$
$$= 6283.2^{-1}$$

يمكنك حل ذلك بسهولة كبيرة. قم بإجراء عملية التقسيم $C = 1/6283.2$ بواسطة الآلة الحاسبة لتحصل على $C = 0.00015915$. بما أن التردد معطى بالميغا هرتز، فستظهر هذه السعة بالمايكرو فاراد، لذا $C = 0.00015915\ \mu F$. يجب تقريب هذا العدد في هذا السيناريو بالتدوير إلى $C = 0.000159\ \mu F$. يمكنك أيضاً أن تقول إن $C = 159\ pF$. (تذكر أن $1\ pF = 0.000001\ \mu F$).

إن إجراء الحسابات عند التعامل مع المُفاعَلة السعوية أصعب قليلاً من نظيره في المُفاعَلة التحريضية لسببين. الأول، عليك التعامل مع المقلوب، ولذلك تصبح الأعداد في بعض الأحيان عسيرة. الثاني، عليك مراقبة الإشارات السالبة. من السهل إهمال هذه الإشارات السالبة أو وضعها في المكان غير المناسب. إن هذه الإشارات هامة عند النظر إلى المُفاعَلات في مستوى الإحداثيات لأن الإشارة السالبة تعني أن المُفاعَلة سعوية وليست تحريضية.

النقاط في ربع المستوى RC

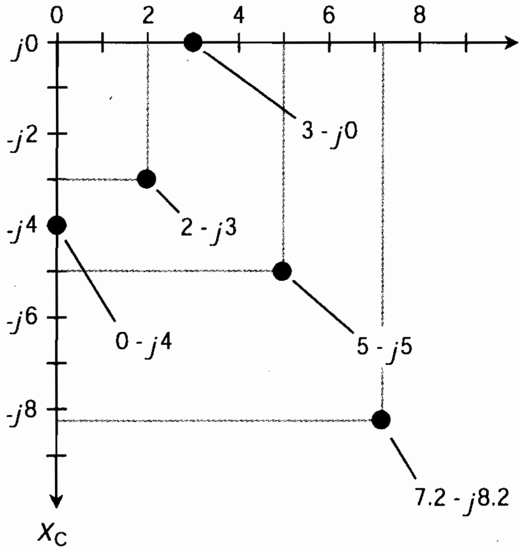
يمكن رسم المُفاعَلة على طول نصف مستقيم أو شعاع تماماً كالمُفاعَلة التحريضية. تُعتبر المُفاعَلة السعوية والتحريضية كمستقيم الأعداد الحقيقية. إن نقطة التقائهما هي نقطة المُفاعَلة صفر.

في دارة تحتوي على مقاومة ومُفاعَلة سعوية، تكون الخصائص ثنائية الأبعاد بشكل يشبه حالة ربع المستوى RL. يمكن وضع شعاع المقاومة وشعاع المُفاعَلة السعوية بشكل متلاصق وبحيث يشكلان زاوية قائمة فيما بينهما لتشكيل *ربع المستوى* RC (الشكل (15–10)). المقاومة مرسومة أفقياً، والقيم متزايدة باتجاه اليمين. المُفاعَلة السعوية مرسومة باتجاه الأسفل، وتتزايد القيم السالبة بالانتقال إلى الأسفل.

يمكن الإشارة إلى الممانعات العقدية التي تحوي مقاومة وسعة بالشكل $R + jX_C$؛ ولكن، لا يمكن أن تكون X_C موجبة أبداً. وبسبب ذلك يكتب العلماء عادةً $R - jX_C$، مُسقطين إشارة الطرح من X_C ومستبدلين الجمع بالطرح في إظهار العدد العقدي.

إذا كانت المقاومة صرفة، ولنقل 3 أوم، تكون الممانعة ذات العدد العقدي $3 - j0$، وهذا يوافق النقطة (3,0) في ربع المستوى RC. قد تشك بأن $3 - j0$ هي نفسها $3 + j0$ وأنك لا تحتاج أبداً لكتابة الجزء $j0$ على الإطلاق. هاتان الفكرتان صحيحتان نظرياً. ولكن، تشير كتابة الجزء $j0$ إلى الإمكانية المفتوحة لاحتمال وجود مُفاعَلة في الدارة، وإلى أنك تعمل في ثنائي الأبعاد.

إذا كان لديك مُفاعَلة سعوية صرفة، ولنقل، $X_C = -4\ \Omega$، إذاً تكون الممانعة العقدية $0 - j4$، وهذا يوافق النقطة $(0, -4)$ في ربع المستوى RC، مرة أخرى، من المهم كتابة 0 وليس مجرد $-j4$ وذلك للإكمال. تم رسم النقاط $3 - j0$ و$0 - j4$ ورسم ثلاث نقاط أخرى في ربع المستوى RC في الشكل (15–10).



الشكل (15-10): خمس نقاط تُمثِّل خمس ممانعات حقيقية محددة مرسومة في ربع المستوى RL.

لجميع المُكثِّفات في الدارات العملية بعض *الناقلية المتسربة*. إذا اقترب التردد من الصفر، أي إذا كان المُزوِّد dc، سيتدفق تيار طفيف لأنه لا يوجد عازل كهربائي مُكوَّن من مادة عازلة كهربائية مثالية. لا يوجد لبعض المُكثِّفات ناقلية تسريب تقريباً، ولكن لا يوجد مُكثِّف خال منها تماماً. بشكل معاكس، للنواقل الكهربائية مُفاعَلة سعوية صغيرة ببساطة لأنها تشغل فضاءً فيزيائياً. بالنتيجة لا يوجد ناقل كالناقل الرياضي الصرف في ac. إنّ النقاط $3 - j0$ و$0 - j4$ هي نقاط مثالية.

تذكر أن قيم X_C هي قيم مُفاعَلات، وليست قيم سعات. تتغيّر المُفاعَلة بتغيّر التردد في دارة RC. تتغيّر قيمة X_C بزيادة التردد أو نقصانه. يسبب التردد العالي نقصان سالبية X_C (الاقتراب من الصفر). ويسبب تخفيض التردد زيادة سالبية X_C (الابتعاد عن الصفر أو الهبوط للأسفل في ربع المستوى RC). إذا سعى التردد إلى الصفر، ستهبط المُفاعَلة السعوية إلى قاعدة المستوى، خارج الشكل. يكون لديك في هذه الحالة صفيحتان أو مجموعات من الصفائح التي تملك شحنات كهربائية متعاكسة ولكن لا "عمل" لها.

الممانعة RLC

رأينا كيفية تمثيل المُفاعَلة التحريضية والسعوية على طول مستقيم المقاومة العامودي. سنضع في هذا القسم الكميات الثلاث R، X_L، وX_C مع بعضها، لتكوين تعريف عامل كامل *للمانعة*.

نصف المستوى RX

تذكر أرباع المستوى الخاصة بالمقاومة R والمُفاعَلة التحريضية X_L من الفقرات السابقة. إنه ربع المستوى اليميني الأعلى نفسه في مستوى الأعداد العقدية. بشكل مشابه ربع المستوى الخاص بالمقاومة R

والمُفاعَلــة التحريــضية X_C هــو نفــسه ربع المستوى اليميني الأسفل في مستوى الأعداد العقدية. تُمثَّل المقاومــات بأعــداد حقيقــية غير سالبة. توافق المُفاعَلات إن كانت تحريضية (موجبة) أو سعوية (سالبة) الأعداد التخيلية.

لــنقل بوضوح أن المقاومة السالبة غير موجودة، أي لا يوجد شيء أفضل من الناقل المثالي. يمكن في بعض الحالات، التعامل مع مُزوِّد dc، كالبطارية على أنه مقاومة سالبة؛ يمكن أن يتصرف الجهاز في حالات أخرى وكأن مقاومته سالبة تحت شروط معينة متغيرة. ولكن، تكون قيمة المقاومة غير سالبة بشكل عام، في *نصف المستوى* RX (مقاومة - مُفاعَلة) وذلك موضح في الشكل (15-11).

المُفاعلة في الحالة العامة

يجــب أن تكــون قــد حصلت الآن على فكرة أفضل حول سبب اعتبار المُفاعَلة X_C سالبة. بمعنى أنهــا امــتداد المُفاعَلــة التحريــضية X_L في حقــل الأعداد السالبة، وبحيث يستحيل تواجدها عموماً مع المقاومــة. تتــصرف المُكــثِّفات "كمُحرِّضــات ســالبة". تحــدث الأمور الهامة عند وصل المُحرِّضات والمُكثِّفات.

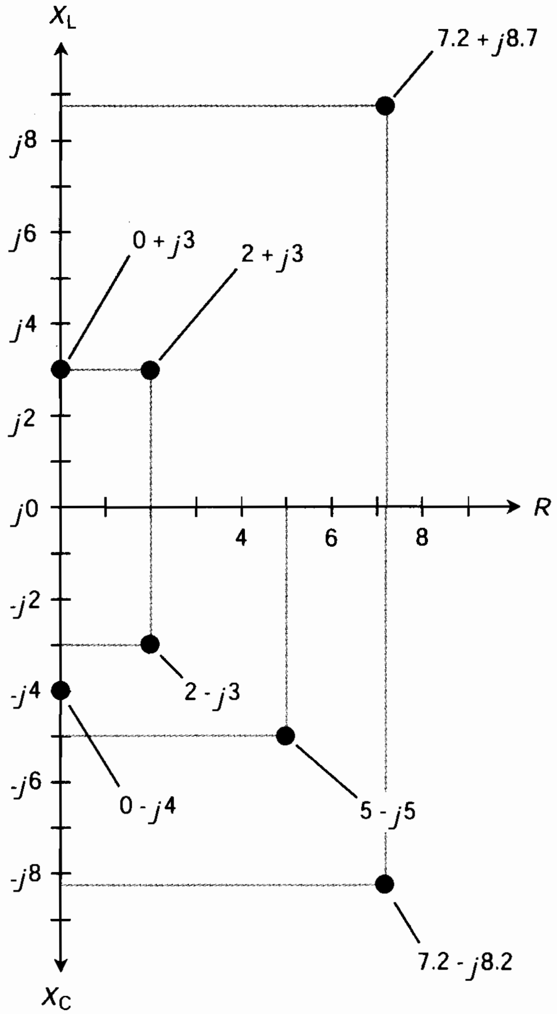
يمكــن أن تتغيّــر قيم المُفاعَلة من قيم سالبة لا نهائية، مروراً بالصفر، وإلى قيم موجبة لانهائية. يُكمِّم المهندســون والفيزيائيون دائماً المُفاعَلات كأعداد تخيلية. تُمثِّل السعات والتحريضات في النموذج الرياضي للممانعــة بشكل عامودي على المقاومة. لذا تشغل مُفاعَلة ac بُعداً مختلفاً ومستقلاً عن مقاومة dc. الرمز العام للمُفاعَلة هو X؛ يضم ذلك كلاً من المُفاعَلة التحريضية X_L والمُفاعَلة السعوية X_C.

التمثيل الشعاعي للممانعة

يمكن تمثيل أي ممانعة Z بالعدد العقدي $R + jX$، حيث يمكن أن يكون R أي عدد حقيقي غير سالب ويمكــن أن يكون X أي عدد حقيقي. يمكن رسم أعداد كهذه كنقاط في نصف المستوى RX أو كأشعة تكون نقاط نهايتها في المبدأ $(0 + j0)$. تُدعى هذه الأشعة *بأشعة الممانعة*.

تخــيّل كــيف يتغيّر شعاع الممانعة بتغيّر R أو X أو تغيرهما معاً. إذا بقي X ثابتاً، ستسبب زيادة R عندها زيادة في طول الشعاع. إذا بقي R ثابتاً وأصبحت X_L أكبر، يصبح الشعاع أطول أيضاً. إذا بقي R ثابتاً وأصبحت X_C أكبر (سالبية)، يصبح الشعاع أطول ثانية. فكر بالنقطة التي تمثل $R + jX$ والتي تدور في المستوى، وتخيل أين ستقع النقاط الموافقة على محور المقاومة والمُفاعَلة. يمكن إيجاد هذه النقاط برسم خطوط مــستقيمة من النقطة $R + jX$ إلى المحاور R وX وبحيث تتقاطع المستقيمات مع المحاور مشكلة زوايا قائمة معها. يوضح الشكل (15-11) عدة نقاط مختلفة.

فكر الآن بالنقاط عندما تنتقل R وX باتجاه اليمين واليسار أو للأعلى أو الأسفل على محاورها. تخيل مــا يحدث للنقطة $R + jX$ والشعاع الموافق من $0 + j0$ إلى $R + jX$ بسيناريوهات متنوعة. يُعبر ذلك عن كيفية تغيّر الممانعة عندما تتغيّر المقاومة والمُفاعَلة في الدارة.



الشكل (15-11): ممانعات عقدية محددة ممثلة بنقاط في نصف المستوى RX.

القيمة المطلقة للممانعة

ســـتقرأ أو ستـــسمع في بعض الأحيان أن "ممانعة" جهاز أو مُكوِّن ما مساوية لعدد معين من الأوم. مـــثلاً، يوجد في الإلكترونيات السمعية مداخل لمضخمات مكبرات الصوت "8 - أوم" و"600 - أوم". كيف يستطيع المُصنِّعون إيراد عدد واحد لمقدار ثنائي الأبعاد حيث نحتاج لعددين للتعبير عنه بشكل كامل؟ يوجد جوابان لهذا الأمر.

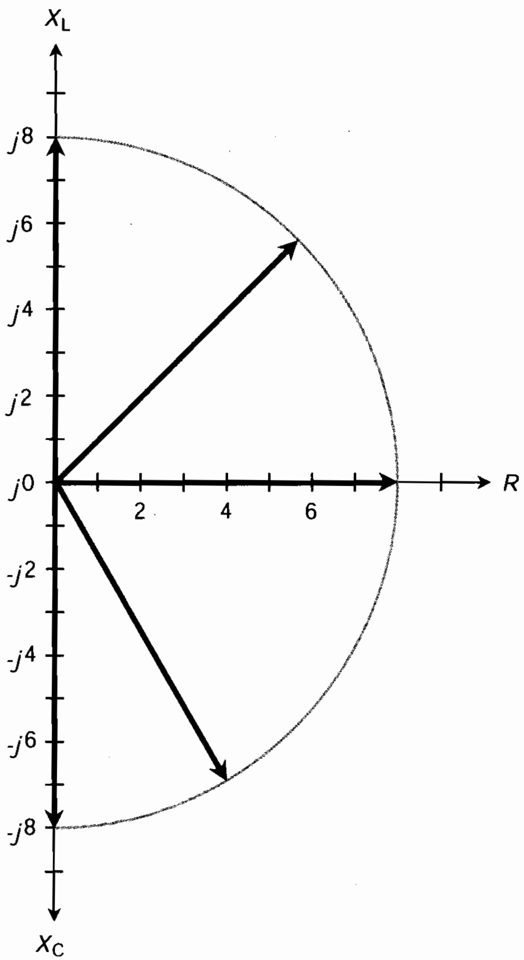
الأول، تـــشير أرقـــام كهذه عموماً إلى أجهزة لها ممانعات أومية صرفة. لذا فإن مكبر الصوت "8 - أوم" له ممانعة عقدية 8 + $j0$، ودارة الدخل " 600 - أوم" مصممة للعمل بممانعة عقدية مساوية أو قريبة

من $600 + j0$. الثاني، يتحدث المهندسون في بعض الأحيان عن طول شعاع الممانعة، ليقولوا أن ذلك يُمثّل عدداً معيناً من "الأوم". إذا تحدثت عن هذه "الممانعة" بهذه الطريقة، فأنت تتحدث إذاً بشكل غامض نظرياً لأنه يمكن أن يكون لديك عدد لا نهائي من الأشعة المختلفة لطول معطى في نصف المستوى RX.

يمكـــن أن تـــشير العبارة "$Z = 8\ \Omega$" إذا لم تُعطَ ممانعة عقدية محددة إلى الأشعة العقدية $8 + j0$ أو $0 + j8$ أو $0 - j8$ أو أي شـــعاع في نـــصف المـــستوى RX طـــوله 8 وحـــدات. إن ذلك موضح في الـــشكل (15-12). يمكـــن أن يتواجد عدد لا نهائي من الممانعات العقدية المختلفة ذات القيمة $Z = 8\ \Omega$ بالمعنى التقني البحت.

مسألة (15-10)

اذكر سبع ممانعات عقدية مختلفة قيمتها المطلقة $Z = 10\ \Omega$.



الشكل (15-12): أشعة تمثل القيمة المطلقة لممانعة 8 أوم.

حل مسألة (15-10)

مــن الــسهل أن نذكر ثلاثة: $0 + j10$، و$10 + j0$، و$0 - j10$. وهي تحريض صرف، ومقاومة صرفة، وسعة صرفة، على التوالي.

يمكــن أن يوجد مثلث قائم الزاوية بحيث تكون نسب أضلاعه 10:8:6. وذلك صحيح لأنه $6^2 + 8^2 = 10^2$. (إنها نظرية فيثاغورث القديمة!) لذلك، يمكن أن يكون لدينا $6 + j8$، و$6 - j8$، و$8 + j6$، و$8 - j6$. تُمثّل جميعها ممانعات عقدية قيمها المطلقة مساوية 10 أوم.

إذا لم يتم إخبارك بشكل محدد عن معنى الممانعة العقدية الخاصة عند إيراد عدد واحد بشكله الأومي، من الأفضل الافتراض بأن المهندسين يتحدثون عن *ممانعات تفاعلية*. إن ذلك يعني أنها مقاومات صرفة، وأن العوامل التخيلية أو التفاعلية صفر. سيتحدث المهندسون عادةً عن ممانعات لا تفاعلية مثل "Z – المنخفضة" أو "Z – المرتفعة". لا يوجد خط فاصل بين عوالم الممانعة المنخفضة والمرتفعة؛ يعتمد ذلك إلى حدّ ما على التطبيق. تُدعى الممانعة الخالية من المُفاعَلة في بعض الأحيان *بالمقاومة الصرفة أو الممانعة المقاومة*.

إن الممانعــات المقاومَــةِ الــصرفة مرغوبة في دارات إلكترونية وكهربائية متنوعة. كُرِّست مجلدات بكاملــها لموضوع الممانعة في التطبيقات الهندسية. لقد قدمنا حتى الآن ما فيه الكفاية في الفيزياء الأساسية. يمكــن إيجاد مقدمة اكثر تفصيلاً حول هذا الموضوع في Teach Yourself Electricity and Electronics، الــصادر عــن McGraw-Hill. ونحــن نقتــرح كتب الكليات في هندسة الكهرباء، والإلكترونيات، والاتصالات.

امتحان موجز

عــد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. وُصلت ثلاثة مُكثّفات قيمها 300 – pF على التسلسل. ما هي مُفاعَلة هذا التركيب؟
   (a) 100– أوم.
   (b) 300– أوم.
   (c) 900– أوم.
   (d) نحتاج لمزيد من المعلومات لحسابها.
2. ثلاثة مُكثّفات 300 – pF وُصلت على التفرع. ما هي سعة هذا التركيب؟
   (a) PF 100
   (b) PF 300
   (c) PF 900

(d) نحتاج لمزيد من المعلومات لحسابها.

3. الممانعة العقدية الصرفة ذات العدد 47 أوم هي

(a) $j0 + 47$.

(b) $j47 - 0$.

(c) $j47 + 0$.

(d) $j47 + 47$.

4. تم تحديد الممانعة العقدية لُمكوِّن $-25 + j30$. تستطيع من ذلك أن تستنتج بشكل مقبول أن

(a) يوجد خطأ طباعي في المستند.

(b) المُفاعَلة سعوية.

(c) الممانعة مقاومة صرفة.

(d) الجهاز يعمل بالتيار متناوب dc.

5. يمكن لمادة صلبة ذات ثابت عازلية كهربائي وموجودة بين لبوسي مُكثِّف أن

(a) تُخفِّض السعة مقارنة بالعازل الهوائي.

(b) تزيد السعة مقارنة بالعازل الهوائي.

(c) تزيد التردد.

(d) تُخفِّض التردد.

6. إذا تضاعف تحريض الملف، إذاً X_L وتحت أي تردد

(a) تتضاعف قيمتها.

(b) تتضاعف قيمتها بمقدار أربعة أضعاف.

(c) تصبح قيمتها النصف.

(d) تصبح قيمتها الربع.

7. عند تطبيق جهد dc على مُحرِّض، تكون المُفاعَلة نظرياً

(a) لا نهاية سالبة.

(b) لا نهاية موجبة.

(c) صفر.

(d) معتمدة على الجهد.

8. أشعة الممانعة العقدية لمقاومة صرفة تساوي 30 أوم وسعة صرفة قيمتها 100 µF

(a) لهما الطول نفسه.

(b) متعامدان مع بعضهما.

(c) يتجهان باتجاهين متعاكسين.

(d) ولا أي من الحالات السابقة.

9. بزيادة تردد الجهد ac على مُكثّف 33- pF،

(a) يمانع المُكثّف بشكل أقل وأقل التيار المتناوب ac.

(b) يمانع المُكثّف بشكل أكبر وأكبر التيار المتناوب ac.

(c) لا تتغيّر ممانعته للتيار المتناوب ac.

(d) قد تزيد ممانعة ac أو تنقص اعتماداً على سرعة تغيّر التردد.

10. تُمثّل الممانعة العقدية $500 + j0$.

(a) مقاومة صرفة.

(b) مُفاعَلة تحريضية صرفة.

(c) مُفاعَلة سعوية صرفة.

(d) دارة مقصورة.

الفصل 16

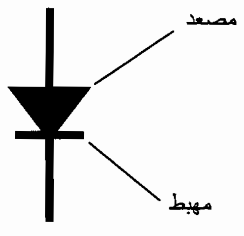
أنصاف النواقل

ظهـــر اصـــطلاح *نصف الناقل* من قدرة مواد معينة على النقل بشكل جزئي. يمكن أن تعمل مزائج متنوعة من العناصر كأنصاف نواقل. يوجد نمطان من أنصاف النواقل، *النمط* n والذي تكون معظم حوامل الشحنة فيه إلكترونات، *والنمط* p، والذي تكون معظم حوامل الشحنة فيه عبارة عن غياب الإلكترونات والتي تدعى *بالثقوب*. سنتعلم في هذا الفصل القليل عن المكوِّنات الإلكترونية نصف الناقلة.

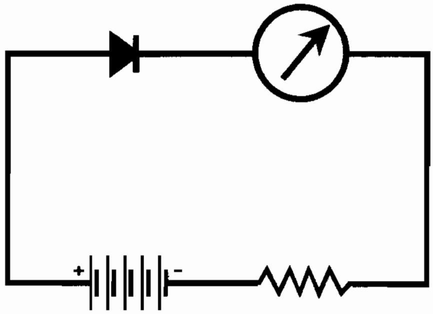
الديود

عندما تكون رقاقات من النمط n ومن النمط p على تماس فيزيائي، تكون النتيجة وصلة p–n ذات خـــصائص معينة. يوضح الشكل (16–1) الرمز الإلكتروني *للديود* نصف الناقل. تُمثّل المادة من النمط n بخط مستقيم قصير في الرمز ويشكل *المهبط*. تُمثّل المادة من النمط p بسهم وتشكل *المصعد*.

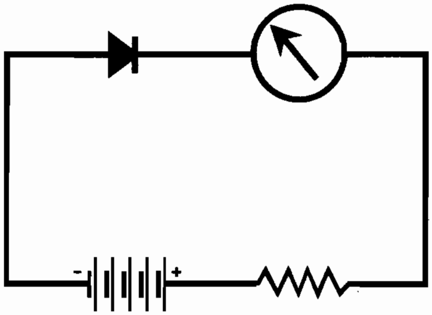
تـــتدفق الإلكترونات في الديود المثالي باتجاه معاكس لاتجاه السهم، ولكنها لا تستطيع التدفق بالاتجاه الـــذي يشير السهم له. إذا تم وصل بطارية ومقاومة على التسلسل مع الديود، يتدفق التيار إذا كان المهبط سالباً بالنسبة للمصعد (الشكل (16–2–أ)) ولكن لا يتدفق إذا تم عكس البطارية (انظر للشكل (16–2–ب)). إنـــه مثال يجب أن تكون قد ألفته الآن: السيناريو المثالي! في العالم الحقيقي، يمكن أن تقترب الديودات من حالة الناقل المثالي الذي ينقل باتجاه واحد ولكن لن تبلغها.



الشكل (16–1): رمز مهبط ومصعد الديود.



(أ)



(ب)

الشكل (16-2): (أ) يُنتج الانحياز الأمامي للديود تدفق التيار.
(ب) يُنتج الانحياز العكسي بشكل طبيعي تياراً قريباً من الصفر.

جهد الفتح الأمامي

عند وصل وصلة *p–n* بالأسلوب الموضح في الشكل (16-2-أ)، يحتاج الديود لجهد أصغري معين ليمرر التيار. يدعى هذا الجهد *بجهد الفتح الأمامي* (أو ببساطة *الفتح الأمامي*) للديود. يمكن أن يتراوح جهد الفتح الأمامي من حوالى 0.3 V إلى 1 V وذلك اعتماداً على نوع المادة التي صُنع منها الديود. إذا لم يكن الجهد المُطبَّق على وصلة p–n مساوياً على الأقل لجهد الفتح الأمامي، لن ينقل الديود بشكل يمكن تقديره.

تُضاف جهود الفتح الأمامية لعدة ديودات مع بعضها وكأن الديودات عبارة عن بطاريات. عند وصل ديودين أو أكثر على التسلسل مع توجيه وصلات *p–n* بالاتجاه نفسه، يكون جهد الفتح الأمامي للتركيب مساوياً لمجموع جهود الفتح الأمامية لكل الديودات. عند وصل ديودين أو أكثر على التفرع مع توجيه وصلات *p–n* بالاتجاه نفسه، يكون جهد الفتح الأمامي للتركيب مساوياً لجهد الفتح الأمامي الأصغر. إن وصلة *p–n* فريدة بهذا التركيب. إنها لا تنقل بشكل مثالي بالاتجاه الأمامي، ولكنها لا تتصرف تماماً كمقاومة dc عندما تنقل.

الانحياز

في وصلة $p–n$، عندما تكون المادة من النمط n سالبة بالنسبة إلى المادة من النمط p، تتدفق الإلكترونات بسهولة من n إلى p. إنه *الانحياز الأمامي*؛ ينقل الديود بشكل جيد. عند تبديل القطبية بحيث تكون المادة من النمط n موجبة بالنسبة للمادة من النمط p، نكون في حالة *الانحياز العكسي*، وينقل الديود بشكل ضعيف.

عند انحياز الديود عكسياً، تُسحب إلكترونات المادة من النمط n باتجاه الشحنة الموجبة، وتُسحب الثقوب باتجاه الشحنة السالبة، بعيداً أيضاً عن الوصلة. تصبح الإلكترونات (في المادة من النمط n) والثقوب (في المادة من النمط p) مستنفذة في جوار الوصلة. تُمانع هذه الحالة النقل، وتتصرف *منطقة الاستنفاذ* كعازل كهربائي أو كمادة عازلة كهربائياً.

سعة الوصلة

يمكن أن تتصرف وصلة $p–n$ كمُكثِّف في شروط الانحياز العكسي. جرى تصنيع ديود من نمط خاص يدعى *الفاركتر* للاستفادة من هذه الخاصة. يمكن تغيير *سعة وصلة* الفاركتر من خلال تغيير جهد الانحياز العكسي لأن هذا الجهد يؤثر على عرض منطقة الاستنفاذ. كلما ازداد الجهد العكسي، كلما ازداد عرض منطقة الاستنفاذ وكلما أصبحت السعة أصغر. يمكن أن يعرض الفاركتر الجيد سعة تتقلب بسرعة، مُتبِّعة تغيرات الجهد صعوداً إلى الترددات العالية.

الانهيار

إذا كان الديود في حالة انحياز عكسي وأصبح الجهد مرتفعاً كفاية، ستقوم الوصة $p–n$ بالنقل. يدعى ذلك *بتأثير الانهيار*. يرتفع التيار العكسي والذي يكون قريباً من الصفر عند الجهود المنخفضة، بشكل كبير. يختلف *جهد الانهيار* باختلاف أنواع الديودات. يوضح الشكل (16–3) *نقطة الانهيار* في منحنى خصائص تيار بدلالة الجهد لديود نصف ناقل نموذجي. إن جهد الانهيار أكبر بكثير ومعاكس في القطبية لجهد الفتح الأمامي. يُستخدم *ديود زينر* تأثير الانهيار. تم تصنيع ديودات زينر بشكل خاص ليكون لها جهود انهيار دقيقة. تستخدم ديودات زينر الانحياز لتنظيم جهود مُزوِّدات القدرة dc.

التقويم

يُمرر *الديود المُقوِّم للتيار* باتجاه واحد فقط تحت شروط تشغيل مثالية. يجعل ذلك الديود مفيداً في تحويل ac إلى dc.

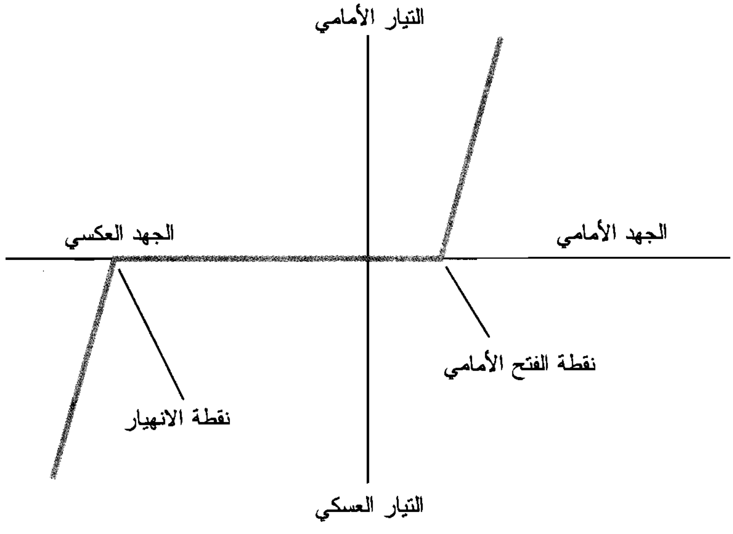
عموماً، عندما يكون المهبط سالباً بالنسبة للمصعد، يتدفق التيار؛ عندما يكون المهبط موجباً بالنسبة للمصعد، لا يتدفق التيار. تُعتبر جهود الفتح الأمامية وجهود الانهيار قيود هذا السلوك. خلال أقل بقليل من نصف الدورة، ينقل الديود، وخلال أكثر من نصف الدورة بقليل، لا ينقل الديود. يقطع ذلك أكثر بقليل

من 50 بالمئة من دورة ac. يجري حجز القسم الموجب أو القسم السالب من دورة ac وذلك اعتماداً على طريقة توصيل الديود في الدارة.

الكشف

يستطيع الديود استعادة الإشارة السمعية من التردد الراديوي (rf) للتيار المتناوب. يدعى ذلك بكشف *التعديل* أو *الكشف*. ليكون ديود الكشف فعالاً، يجب أن تكون سعة وصلة الديود منخفضة. وبالتالي يستطيع العمل كمُقوِّم في rf، ليمرر التيار باتجاه واحد ولا يمرره بالاتجاه الآخر.

إن بعض ديودات rf هي إصدارات بالغة الدقة لما يدعى cat whisker، وهي تُستخدم لتشكيل تماس تقويم مع سطح نصف الناقل، والتي يوضع فيها سلك دقيق على تماس مع بلورة معدنية -مصنوعة من كبريت الرصاص PbS- تدعى *غالينا* (galena). تُعرف المُكوِّنات من هذا النمط *بديودات نقطة-تماس* وهي مُصمَّمة لتصغير سعة الوصلة للحد الأدنى. بهذه الطريقة وبازدياد التردد أكثر وأكثر (إلى حدّ أقصى معين)، تستمر الديودات بالعمل كمُقوِّمات بدلاً من البدء بالتصرف كمُكثِّفات. يجعل ذلك من ديودات نقطة-التماس جيدة الاستخدام في rf.



الشكل (16-3): المنحنى المُميِّز لديود نصف ناقل.

ديودات غان (Gunn)

يصنع *ديود غان* من مُركَّب يدعى *غاليوم أرسينيد* (GaAs). عند تطبيق جهد على هذا الجهاز، فإنه يهتز بسبب *تأثير غان*، والذي سمي بهذا الاسم نسبة إلى J. Gunn of International Business Machines (IBM)، والذي لاحظ الظاهرة لأول مرة في ستينيات القرن العشرين. يحدث الاهتزاز نتيجة لخاصة تُدعى بخاصة *المقاومة*

السالبة. يُعتبر ذلك استخداماً خاطئاً للاسم لأنه، وكما تعلمنا، لا توجد مادة تنقل بشكل أفضل من الناقل المثالي. تشير *المقاومة السالبة* بهذا المعنى إلى حقيقة أنه خلال جزء محدد معين من المنحنى المُميِّز، ينخفض التيار في ديود غان بزيادة الجهد، مناقضاً لما يحدث بشكل طبيعي في النظم الكهربائية.

ديودات أي إم بات (IMPATT)

IMPATT (وتلفظ "IM–pat") هي كلمة مؤلفة من أوائل مجموعة الكلمات *impact avalanche transit time* وتعني زمن عبور تأثير الانهيار. لن نشغل أنفسنا في هذا الكتاب بالطبيعة الدقيقة لهذا التأثير، باستثناء ملاحظة أنه مشابه للمقاومة السالبة. إن ديود أي إم بات (IMPATT) هو جهاز يهتز بأمواج مايكروية كديود غان ولكن جرى تصنيعه من السيلكون بدلاً من الغاليوم أرسينيد.

يمكن استخدام ديود IMPATT *كمُضخِّم* للإشارات الراديوية الماكروية منخفضة القدرة. يُنتِج ديود IMPATT عندما يعمل كمهتز (دارة تُولِّد تردداً راديوياً بتيار متناوب) الكمية نفسها تقريباً من قدرة الخرج التي يُنتجها ديود غان في الترددات المشابهة.

الديودات النفقية

الديود النفقي هو نوع آخر من الديودات التي تستطيع الاهتزاز بترددات مايكروية وتعرف *بديود إيساكي*. يُنتج الديود النفقي كمية صغيرة جداً من القدرة rf.

تعمل الديودات النفقية بشكل جيد كمُضخِّمات في مُستقبلات الموجة المايكروية. وينطبق الأمر نفسه على أجهزة الغاليوم آرسينيد (GaAs)، والتي تزيد سعات الإشارات الضعيفة دون إدخال أي ضجيج ذي تردد راديوي غير مرغوب أو إدخال إشارات تغطي مجالاً واسعاً من الترددات. (يشكل الصفير الذي تسمعه في مُضخِّم ستريو hi–fi عند زيادة الربح وعدم وجود دخل سمعي مثالاً للضجيج. المُضخِّم الأقل ضجيجاً هو الأفضل).

الديودات الضوئية وديودات الأشعة تحت الحمراء (LEDs وIREDs)

اعتماداً على المزج الدقيق لأنصاف النواقل المستخدمة في الصناعة، يمكن إنتاج ضوء مرئي من أي لون، ويمكن إنتاج الأشعة تحت الحمراء (IR)، عند مرور تيار بالاتجاه الأمامي. اللون الأكثر شيوعاً *للديود الباعث للضوء* (LED) هو الأحمر الساطع، على الرغم من توفر الديودات الضوئية بعدة ألوان مختلفة. يُنتج *الديود الباعث للأشعة تحت الحمراء* (IRED) طاقة بأطوال موجية أطول بشكل طفيف من الأطوال الموجية للضوء الأحمر المرئي. وتدعى *بالأشعة تحت الحمراء القريبة* (NIR).

تعتمد شدة إصدار الطاقة من LED أو IRED إلى حدّ ما على التيار الأمامي. يزداد السطوع بزيادة التيار، إلى نقطة معينة. إذا استمر التيار بالارتفاع، لن يكون هناك أي زيادة في السطوع. يقال عن LED أو IRED عندها إنه في حالة *إشباع*.

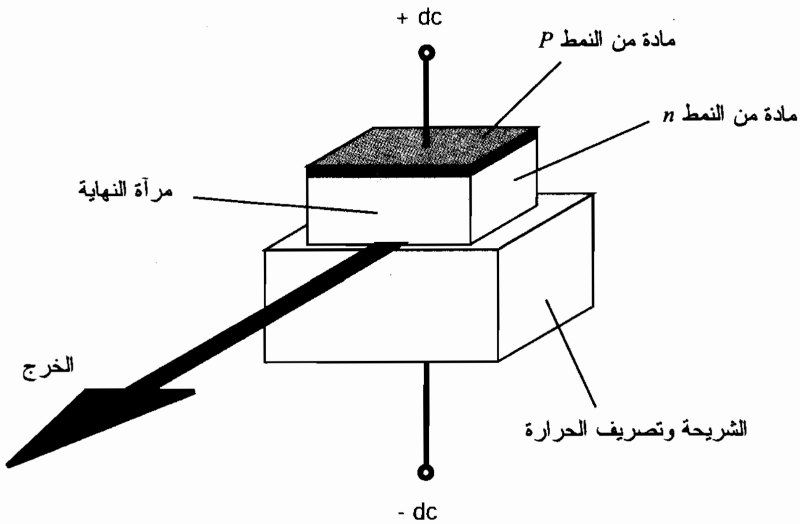
ليزرات الحقن

إن *ليزر الحقن*، الذي يدعى أيضاً *بالديود الليزري*، هو شكل خاص من LED أو IRED بوصلة p-n مسطحة وكبيرة نسبياً. يُصدر ليزر الحقن أمواجاً كهرطيسية مترابطة بشرط أن يكون التيار المُطبَّق كافياً. جميع الأمواج المترابطة مرتبة، ولجميعها التردد نفسه مقارنة بالأمواج غير المترابطة التي تُنتجها معظم الديودات المصدرة للضوء والأجهزة المُنتجة للضوء في الحالة العامة.

يوضح الشكل (16-4) مخططاً مبسطاً لديود ليزري. *الشريحة* هي المادة التي يُبنى المُكوِّن عليها؛ إنها تشبه أساس البناء. تخدم هذه الشريحة أيضاً بتصريف الحرارة الزائدة بحيث يستطيع الجهاز تحمل التيار العالي جداً دون تدميره. توجد مرايا في النهايات المتقابلة لقطعة المادة من النمط *n*. تكون إحدى المرايا (المُشار إليها بالرسم) عاكسة للضوء جزئياً. وتكون المرآة المقابلة (غير موضحة) عاكسة كلياً للضوء. تنبثق الأشعة المترابطة من النهاية التي تتواجد فيها المرآة العاكسة جزئياً.

الديودات الضوئية السيليكونية

يوضع الديود السيليكوني في صندوق شفاف، ويُبنى بطريقة يستطيع الضوء المرئي فيها اختراق الحاجز بين المادة من النمط *n* والمادة من النمط *p* التي تشكل *الديود الضوئي*. إنه معاكس بشكل جوهري للديودات الضوئية أو ديودات الأشعة تحت الحمراء. يُطبَّق الجهد على الجهاز بالاتجاه العكسي، وبالتالي لن ينقل التيار بصورة عادية. يتدفق التيار عندما تخترق أشعة الضوء المرئي أو الأشعة تحت الحمراء IR أو فوق البنفسجية (UV) الوصلة *p-n*. يتناسب التيار طرداً مع شدة الطاقة ضمن حدود معينة. إن الديودات الضوئية السيليكونية أكثر حساسية لبعض أطوال الأمواج من أطوال الأمواج الأخرى.



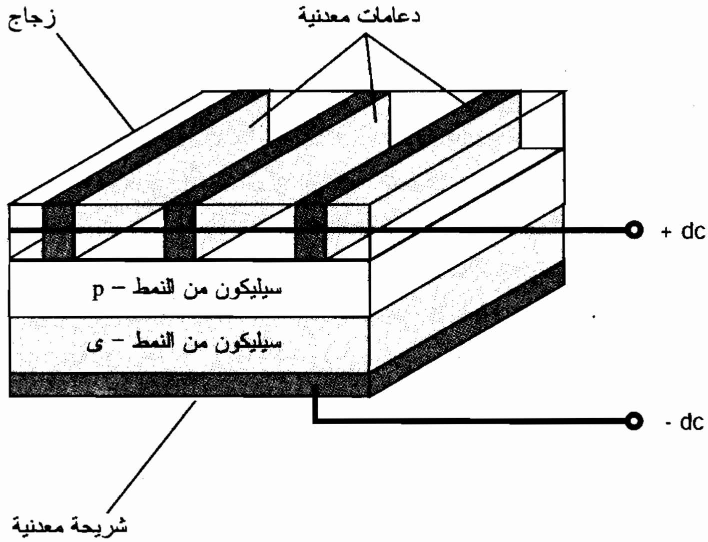
الشكل (16-4): رسم مقطعي مبسط لليزر الحقن، ويعرف أيضاً بالديود الليزري.

عندما ترتطم الطاقة ذات الشدة المتغيرة بوصلة $p–n$ في الديود الضوئي السيليكوني المنحاز عكسياً، يتبع تيار الخرج هذه التقلبات. يجعل ذلك الديودات الضوئية السيليكونية مفيدة لاستقبال الإشارات الضوئية - المعدّلة كما في النوع المُستخدَم في الليف الضوئي ونُظم الاتصالات الليزرية في الفضاء الحر. يتلاشى هذا التأثير بزيادة التردد. يتصرف الديود في الترددات العالية كمُكثِّف بسبب سعة وصلته الكبيرة نسبياً، وينخفض مردود الجهاز كحساس للضوء المُعدّل.

الخلايا الكهرضوئية (PV)

تستطيع بعض أنواع الديودات السيليكونية توليد dc بنفسها إذا ارتطمت طاقة كافية من IR أو الضوء المرئي أو UV بوصلات $p–n$ الخاصة بها. يدعى ذلك *بالتأثير الكهرضوئي*، وهو مبدأ عمل الخلايا الشمسية.

تكون مساحة سطح الوصلة $p–n$ في *الخلايا الكهرضوئية* (PV) كبيرة (الشكل (16–5)). يزيد ذلك من كمية الطاقة المرتطمة بالوصلة بعد مرورها عبر الطبقة الرقيقة من المادة ذات النمط p. تُنتج الخلية السيليكونية الواحدة 0.6 V dc تقريباً في أشعة الشمس المباشرة تحت شروط اللا حمل (أي، عندما لا تكون موصولة بأي جهاز يستجر تياراً منها). تعتمد الكمية العظمى من التيار الذي تستطيع خلية PV تسليمه على مساحة سطح الوصلة $p–n$.



الشكل (16–5): رسم مقطعي مُبسّط لخلية كهرضوئية (*PV*).

توصل خلايا PV السيليكونية بتشكيلات تسلسلية–تفرعية لتُزوِّد الأجهزة الإلكترونية ذات الحالة الصلبة كالراديوهات المحمولة بالقدرة الشمسية. يُشكل تجميع عدد كبير من هذه الخلايا *اللوحة الشمسية*. تُجمع جهود الخلايا عندما تُوصل على التسلسل. تُزوِّد *البطارية الشمسية* النموذجية بجهود 6 أو 9 أو 12

V dc. عـــند وصل مجموعتين متماثلتين أو أكثر من خلايا PV الموصولة تسلسلياً على التفرع، فإن جهد الخـــرج لا يـــزداد، ولكن تصبح البطارية الشمسية قادرة على تسليم المزيد من التيار. تتناسب زيادة سعة تـــسليم التـــيار طـــرداً مـــع عدد المجموعات التي تحوي الخلايا الموصولة على التسلسل حيث تكون هذه المجموعات موصولة على التفرع.

مسألة (16-1)

ما هو عدد خلايا PV التي نحتاجها لإنشاء بطارية شمسية 13.8-V؟

حل (16-1)

يجـــب وصـــل خلايـــا PV علـــى التسلسل بحيث تُجمع الجهود. تُنتج كل خلية PV سيليكونية 0.6 V dc تقريباً. لذلك وللحصول على 13.8 V dc من بطارية شمسية، يجب وصل 13.8/0.6 أو 23 خلية PV على التسلسل.

الترانزستور ثنائي القطبية

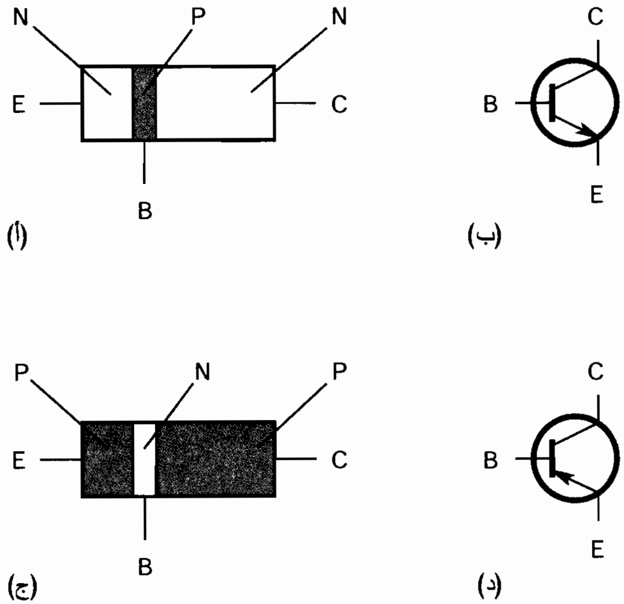
للترانزســـتورات ثنائـــية القطبـــية وصـــلتا p–n موصولتان مع بعضهما. يمكن القيام بذلك بإحدى الطـــريقتين: وضع طبقة من النمط p بين طبقتين من النمط n، أو وضع طبقة من النمط n بين طبقتين من النمط p.

NPN و PNP

يوضـــح الـــشكل (16-6) رسمـــاً مبسطاً *لترانزستور npn* والرمز المُستخدم لتمثيله في المخططات التخطيطـــية. تـــشكل الطبقة من النمط p أو المركز، *القاعدة*. يكون نصف الناقل الرفيع من النمط n هو *الـــباعث*، ويكـــون *المُجمِّـــع* نصف الناقل الأثخن. يُشار في المخططات التخطيطية إليها في بعض الأحيان بالـــرموز B، وE، وC، ولكـــن يـــشير رمز إليها الترانزستور (السهم هو الباعث). إنّ *للترانزستور pnp* (الأقـــسام (ج) و(د)) طبقتين من النمط p، حيث تتموضع كل طبقة على أحد جانبي الطبقة من النمط n. يتجه السهم في رمز *npn* إلى الخارج. ويتجه السهم في رمز رمز *pnp* إلى الداخل.

تـــستطيع ترانزســـتورات *pnp* و*npn* عموماً إنجاز مهمات متماثلة. الفرق الوحيد بينهما هو قطبية الجهـــود واتجاهات التيارات. يمكن في معظم التطبيقات استبدال جهاز *npn* بجهاز *pnp* والعكس بالعكس، مع عكس قطبية مُزوِّد القدرة، وستستمر الدارة بالعمل إذا كانت خصائص الجهاز الجديد مناسبة.

تـــوجد أنـــواع مـــتعددة من الترانزستورات ثنائية القطبية. يُستخدم بعضها في مُضخِّمات rf أو في المهتزات؛ وبعضها الآخر موجه للاستخدام في الترددات السمعية (af). يستطيع بعضها معالجة القدرة العالية عـــند إرســـال التـــرددات الراديوية اللاسلكية أو لتضخيم hi-fi، ويصنع بعضها لاستقبال إشارة التردد الـــراديوي الـــضعيفة، وتُستخدم في المُضخِّمات السابقة للميكروفون، وفي مُضخِّمات المُبدِّلات. تم تصنيع بعضها للعمل كمفاتيح تبديل (قواطع)، وبعضها الآخر موجه لمعالجة الإشارة.



الشكل (16–6): مخطط تصويري لترانزستور *npn* **((أ)، رمز تخطيطي لترانزستور** *npn* **(ب)، مخطط تصويري لترانزستور** *pnp* **(ج)، رمز تخطيطي لترانزستور** *pnp* **(د).**

انحياز NPN

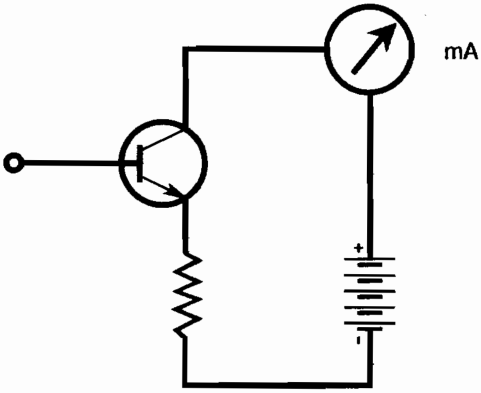
الطريقة الطبيعية لانحياز ترانزستور هي أن يكون الباعث سالباً أكثر من المُجمِّع. يكون كمون الباعث في معظم الحالات، صفراً أو قريباً من الصفر، ويوصَل المُجمِّع إلى القطب الموجب لمُزوِّد الجهد dc. يوضح الشكل (16–7) توصيل البطارية. تتراوح الجهود الطبيعية من 3 V إلى 50 V تقريباً.

يشار للقاعدة "تحكم" لأن تدفق التيار في الترانزستور يعتمد على جهد انحياز القاعدة، يُرمَز له E_{B} أو V_{B} نسبة لجهد انحياز باعث – مُجمِّع، والذي يُرمَز له E_{C} أو V_{C}.

الانحياز الصفري

يكون الترانزستور بحالة *الانحياز الصفري* عندما لا تكون القاعدة موصولة أو عندما يكون كمونها مساوياً لكمون الباعث. تحت هذا الشرط الذي يدعى القطع (*cutoff*)، لا يمكن لأي تيار ذي قيمة أن يتدفق عبر الوصلة *p–n* إذا لم يكن الانحياز الأمامي مساوياً على الأقل لجهد الفتح الأمامي. بالنسبة للسيليكون يكون جهد الفتح 0.6 V، ويكون جهد الفتح للجرمانيوم 0.3 V.

يكون التيار I_{B} في الانحياز الصفري، أي تيار باعث–قاعدة (*E–B*) صفراً، وتكون الوصلة *E–B* غير موصلة. يمنع ذلك التيار من المرور في المُجمِّع إذا لم تُحقَن إشارة في القاعدة لتغيير الوضع. يجب أن تكون قطبية هذه الإشارة موجبة في جزء من دورتها على الأقل، ويجب أن تكون قيمتها كافية للتغلب على جهد الفتح الأمامي لوصلة *E–B* في جزء من الدورة على الأقل.



الشكل (16–7): الانحياز النموذجي لترانزستور *npn*.

الانحياز العكسي

افتـــرض أنـــه تم وصل بطارية أخرى إلى قاعدة ترانزستور *npn* في النقطة المُشار إليها "تحكم" بحيث تكون القاعدة سالبة بالنسبة للباعث. ستؤدي إضافة هذه البطارية الجديدة لانحياز وصلة *E–B* عكسياً. دعنا نفترض أن هذه البطارية الجديدة ليست ذات جهد عالٍ بحيث تؤدي لانهيار وصلة *E–B*.

يجـــب حقـــن إشارة للتغلب على جهد بطارية المسبب للانحياز-العكسي، وللتغلب على جهد الفتح الأمامـــي لوصلة *E–B*، ولكن يجب أن تكون قمم الجهد الموجبة لهذه البطارية مرتفعة كفاية لتنقل الوصلة *E–B* في جزء من الدورة. وإلا سيبقى الديود مقطوعاً في الدورة بكاملها.

الانحياز الأمامي

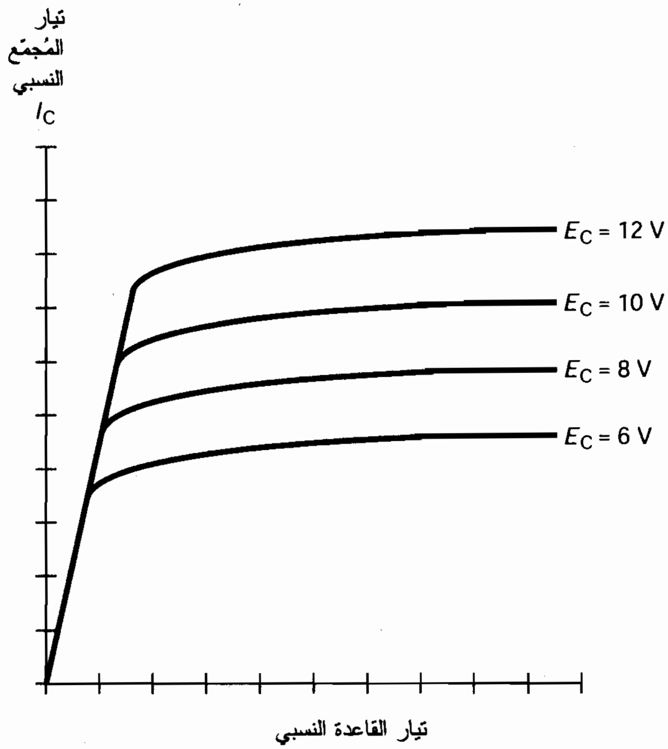
افترض أن قاعدة الترانزستور *npn* منحازة إيجابياً بالنسبة للباعث، وابدأ بمستويات منخفضة ومتزايدة تدريجيـــاً. إنه *الانحياز الأمامي*. إذا كان جهد الانحياز أقل من جهد الفتح الأمامي، لن يمر أي تيار. ولكن عندما يبلغ الجهد جهد الفتح الأمامي، فإن الوصلة *E–B* تنقل التيار.

علـــى الرغم من انحياز وصلة قاعدة-مُجمِّع (*B–C*) عكسياً، إلا أنه يمر تيار باعث مُجمِّع (*E–C*)، يدعى هذا التيار غالباً *بتيار المُجمِّع* ويُرمَز له I_C، عندما تنقل وصلة *E–B*. تُسبب الزيادة الصغيرة في الإشارة ذات القطبـــية الموجبة في القاعدة، والمترافقة بزيادة صغيرة في تيار القاعدة I_B، زيادة كبيرة في التيار I_C. إنه المبدأ الذي يستطيع الترانزستور ثنائي القطبية بواسطته تضخيم الإشارات.

الإشباع

إذا استمر ارتفاع التيار I_B، نصل في النهاية إلى نقطة يزداد التيار I_C عندها بسرعة أقل. يستوي أخيراً تابـــع I_C بدلالة I_B أو منحنى *خصائص الترانزستور*. يوضح الرسم في الشكل (16–8) *عائلة من منحنيات*

خصائص ترانزستور افتراضي ثنائي القطبية. تعتمد القيم الفعلية للتيار على نوع الترانزستور المُستخدم؛ تكون القيم أكبر في ترانزستورات الاستطاعة وأصغر في ترانزستورات الإشارة الضعيفة. يكون الترانزستور في حالة *إشباع* عندما تستوي المنحنيات. تحت هذه الشروط يفقد الترانزستور قدرته على تضخيم الإشارات بفعالية. ولكن، يستطيع الترانزستور العمل لأهداف التبديل (الفصل والوصل).

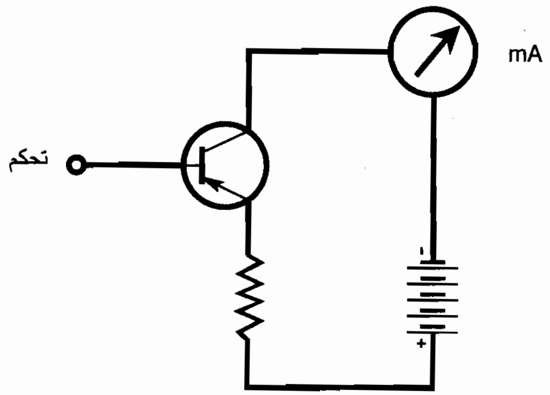


الشكل (16-8): عائلة منحنيات الخصائص لترانزستور افتراضي *npn* ثنائي القطبية.

انحياز PNP

تكون حالة الانحياز للترانزستور *pnp* عبارة عن صورة مرآة لحالة انحياز الترانزستور *npn*، كما هو موضح في الشكل (16-9). تُعكس قطبية مُزوِّدة القدرة. يجب أن تكون قطبية الإشارة المُطبَّقة سالبة بشكل كافٍ للتغلب على جهد الفتح الأمامي للوصلة *E–B*.

يمكن أن يخدم أي من الترانزستورين *npn* أو *pnp* "كحنفية تيار". تؤدي التغيّرات الصغيرة في تيار القاعدة I_B لتقلبات كبيرة في تيار المُجمِّع I_C عند عمل الجهاز في تلك المنطقة من منحنى الخصائص حيث يكون الميل شديد الانحدار. بينما يكون النشاط الذري الداخلي مختلفاً في جهاز *pnp* مقارنة مع جهاز *npn*، يكون أداء التوصيلات الخارجية متطابقاً في الأهداف العملية، في معظم الحالات.



الشكل (16-9): الانحياز النموذجي للترانزستور *pnp*.

تضخيم التيار

يستطيع الترانزستور العمل *كمُضخِّم تيار* لأن تغيّراً صغيراً في التيار I_B يؤدي لتغيّر كبير في التيار I_C عندما يكون الانحياز صحيحاً. يمكن التعبير عن مدى تضخيم كهذا بدلالة ما يحدث مع أي تيار لإشارة الدخل الستاتيكي (الساكن) أو الديناميكي (المتغير).

تضخيم التيار الساكن

يدعى مُعامل تضخيم التيار الأعظم الذي يمكن تحقيقه في الترانزستور ثنائي القطبية بمُعامل الترانزستور بيتا. يمكن أن يتراوح بيتا من مُعامل يبلغ بضع مرات إلى مئات المرات، وذلك اعتماداً على الطريقة التي جرى بها تصنيع الترانزستور. تُعتبر *نسبة تحويل التيار الأمامي* الساكن إحدى طرق التعبير عن مُعامل الترانزستور بيتا، والذي يُرمَز له H_{FE}. وهي تُمثّل نسبة تيار المُجمِّع إلى تيار القاعدة:

$$H_{FE} = I_C/I_B$$

مثلاً، إذا أنتج تيار قاعدة I_B مقداره 1 mA تيار مُجمِّع I_C مقداره 35 mA، بالنتيجة فإن $H_{FE} = 35/1 = 35$. إذا كان $I_B = 0.5$ mA و$I_C = 35$ mA، فإن $H_{FE} = 35/0.5 = 70$.

تضخم التيار الديناميكي

الطريقة الأخرى لتحديد تضخيم التيار هي بحساب نسبة الفرق في التيار I_C إلى الفرق المتزايد الصغير في التيار I_B الذي أنتجه. إنه *تضخيم التيار الديناميكي*، والذي يُعرف أيضاً *بربح التيار*. من المألوف اختصار كلمات الفرق بالحرف اللاتيني الكبير (Δ) في العبارات الرياضية. إذاً، وفقاً لهذا التعريف،

$$\text{ربح التيار} = \Delta I_C/\Delta I_B$$

تكون النسبة $\Delta I_C/\Delta I_B$ أكبر ما يمكن عندما يكون ميل منحنى الخصائص الأشد انحداراً. هندسياً، فإن

النسبة $\Delta I_C/\Delta I_B$ في أي نقطة من المنحنى هي ميل المستقيم المماس للمنحنى في تلك النقطة.

عندما تكون *نقطة تشغيل* الترانزستور في الجزء المائل من منحنى الخصائص، يكون الربح أكبر ما يمكن، ما دامت إشارة الدخل صغيرة. إن هذه القيمة قريبة من H_{FE}. يمكن أن يخدم الترانزستور كمُضخِّم خطي إذا لم تكن إشارة الدخل قوية جداً وذلك لأن منحنى الخصائص عبارة عن خط مستقيم في هذه المنطقة. وهذا يعني أن الشكل الموجي لإشارة الخرج هو نسخة طبق الأصل للشكل الموجي لإشارة الدخل، باستثناء أن سعة الخرج أكبر من سعة الدخل.

بمجرد إزاحة نقطة التشغيل إلى القسم غير المستقيم من منحنى الخصائص، ينخفض ربح التيار، ويصبح المُضخِّم لا خطي. يمكن أن يحدث الشيء نفسه إذا كانت إشارة الدخل قوية كفاية لقيادة الترانزستور إلى الجزء اللاخطي من المنحنى أثناء أي جزء من دورة الإشارة.

الربح بدلالة التردد

ينخفض الربح بزيادة تردد الإشارة وذلك في أي ترانزستور ثنائي القطبية. توجد عبارتان تعبران عن الربح بدلالة التردد.

إن *ربح عرض المجال* (gain bandwidth product)، واختصاراً f_T، هو التردد الذي يصبح ربح التيار فيه مساوياً الوحدة (1) مع وصل الباعث بالأرضي. إن ذلك يعني حقيقةً أنه ليس للترانزستور ربح تيار؛ وتكون سعة تيار الخرج مطابقة لسعة تيار الدخل، حتى لو كانت شروط التشغيل مثالية. إنّ تردد *القطع ألفا* هو التردد الذي يصبح فيه ربح التيار 0.707 (أي 70.7 بالمائة) من قيمته عند التردد 1kHz (1,000 Hz). تستطيع معظم الترانزستورات العمل كمُضخِّمات تيار عند الترددات الأعلى من تردد القطع ألفا، ولكن لا يستطيع الترانزستور العمل كمُضخِّم تيار عند الترددات الأعلى من ربح عرض المجال (gain bandwidth product).

مسألة (16-2)

يبلغ ربح التيار في ترانزستور ثنائي القطبية، في شروط تشغيل مثالية، 23.5 بتردد تشغيل 1,000 Hz. ويبلغ تردد القطع ألفا 900 kHz. ما هو ربح التيار الأعظم للترانزستور عند التردد 900 kHz؟

حل (16-2)

اضرب 23.5 بالعدد 0.707 فتحصل على 16.6. إنه ربح التيار الأعظم الذي يستطيع الترانزستور إنتاجه عند التردد 900 kHz.

مسألة (16-3)

افترض أن تيار إشارة الدخل من القمة-إلى-القمة (pk–pk) في الترانزستور المذكور آنفاً مقداره 2.00 mA عند التردد 1,000 Hz. افترض أيضاً أن شروط التشغيل مثالية وأن الترانزستور غير مُقاد إلى الجزء اللاخطي من منحنى الخصائص أثناء أي جزء من دورة إشارة الدخل. إذا تغيّر التردد إلى 900 kHz، كم سيكون تيار إشارة الخرج pk–pk؟

حل (3-16)

لاحظ أولاً أن ربح التيار للترانزستور 23.5 عند التردد 1,000 Hz. ذلك يعني أن تيار إشارة الخرج pk–pk عند التردد 1,000 Hz هو $2.00\ \mu A \times 23.5 = 47.0\ \mu A$. عند التردد 900 kHz، يكون إذاً تيار إشارة الخرج $0.707 \times 47.0\ \mu A = 33.2\ \mu A$ pk–pk.

الترانزستور ذو التأثير الحقلي

تشكل *الترانزستورات ذات التأثير الحقلي* (FET) الفئة الرئيسية الأخرى من الترانزستورات، التي تُضاف إلى الترانزستورات ثنائية القطبية. يوجد نمطان رئيسيان من FETs: *ترانزستورات الوصلة FET* (JFET)، *وترانزستورات معدن-أكسيد FET* (MOSFET).

مبدأ JFET

يتغير التيار في JFET بسبب تأثيرات الحقل الكهربائي في الجهاز. تنتقل الإلكترونات أو الثقوب على طول مسار للتيار يدعى *القناة* من مسرى المصدر (S) إلى مسرى المصرف (D). يؤدي ذلك إلى تيار مصرف I_D مساوٍ لتيار المصدر I_S. يعتمد تيار المصرف على جهد مسرى البوابة (G). يتغيّر العرض الفعال للقناة بتغيّر جهد البوابة E_G. بالنتيجة، تؤدي التقلبات في E_G إلى تغيرات في التيار المار في القناة. تستطيع التقلبات الصغيرة في E_G إحداث تغيرات كبيرة في تدفق حوامل الشحنة عبر JFET. يسمح هذا التأثير لهذا الجهاز بالعمل *كمُضخِّم جهد*.

القناة N والقناة P

يوضح الشكل (16-10-أ) والشكل (16-10-ب) رسماً مبسطاً للترانزستور *JFET قناة n* ورمزه التخطيطي. تشكل المادة من النمط n مساراً للتيار. تكون أغلب الحوامل عبارة عن إلكترونات. يكون المصرف موجباً بالنسبة إلى المصدر. تتكون البوابة من مادة نصف ناقلة من النمط p. يشكل المقطع الآخر الكبير في المادة من النمط p، الشريحة، والتي تشكل حداً بجانب القناة المقابلة للبوابة. يُنتج الجهد المُطبَّق على البوابة حقلاً كهربائياً يتداخل مع تدفق حوامل الشحنة في القناة. كلما أصبح E_G سالباً أكثر، كلما خفّض الحقل الكهربائي التيار المار في القناة، وكلما أصبح I_D أصغر.

للترانزستور *JFET قناة p* (راجع الشكل (16-10- ج) والشكل (16-10- د)) قناة نصف ناقلة من النمط p. تكون أغلب حوامل الشحنة عبارة عن ثقوب. يكون المصرف سالباً بالنسبة للمصدر. وتكون البوابة والشريحة مصنوعتين من مادة من النمط n. كلما أصبح E_G موجباً أكثر، كلما خفّض الحقل الكهربائي التيار المار في القناة، وكلما أصبح I_D أصغر.

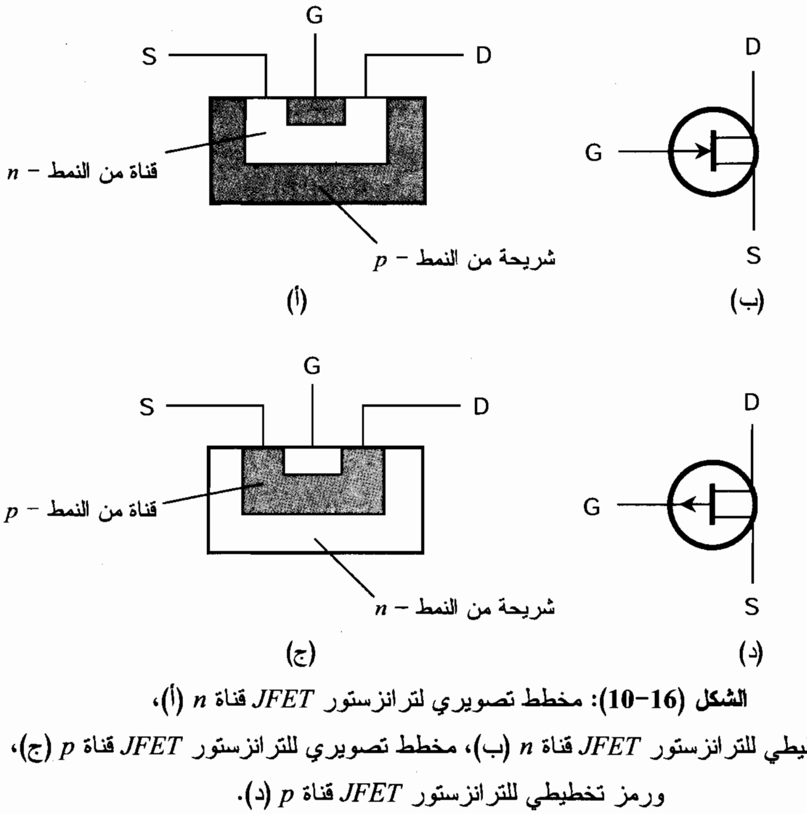
في المخططات الهندسية للدارات، يمكن تمييز الترانزستور JFET قناة n بسهم يتجه داخلاً إلى البوابة، ويمكن تمييز الترانزستور JFET قناة p بسهم يتجه خارجاً. تُظهر قطبية مُزوِّد القدرة أيضاً نمط الترانزستور

المـــستخدم. يُـــشير المصرف الموجب إلى ترانزستور JFET قناة n، ويشير المصرف السالب إلى ترانزستور JEFET قناة p.

يمكـــن دائمـــاً تقريباً استبدال الترانزستور JFET قناة n بالترانزستور JFET قناة p مع عكس قطبية مُزوِّد القدرة، وستستمر الدارة بالعمل إذا كانت مواصفات الترانزستور الجديد صحيحة.

الاستنفاذ وPinchoff

يتداخل الحقل الكهربائي الناتج مع الجهد المُطبَّق على البوابة بشكل كبير أو صغير مع تدفق حوامل الشحنة علـــى طول القناة فيؤدي لعمل JEFT. بزيادة جهد المصرف E_D، يزداد تيار المصرف I_D، إلى قيمة معينة ذات مـــستوى واحد. يبقى الأمر على حاله مع استمرار جهد البوابة E_G ثابتاً وبحيث لا يكون كبيراً جداً. بزيادة E_G (ســـالبٌ في القناة n وموجبٌ في القناة p)، وبالتالي تنمو *منطقة الاستنفاذ* في القناة. لا تستطيع حوامل الشحنة المرور في منطقة الاستنفاذ، وبالتالي يجب أن تمر حوامل الشحنة في قناة ضيقة عند وجود قناة كهذه. عندما يصبح E_G أكبر، تصبح منطقة الاستنفاذ أوسع، وتصبح القناة محدودة أكثر. إذا كان E_G مرتفعاً بشكل كاف، ستعيق منطقة الاستنفاذ عندها تدفق حوامل الشحنة بشكل كامل، ولن تستطيع القناة نقل التيار على الإطلاق. تُعرف هذه الحالة *pinchoff* وهي تشبه الضغط على خرطوم الماء في الحديقة حتى لا يتدفق الماء.



الشكل (16-10): مخطط تصويري لترانزستور *JFET* قناة n (أ)، رمز تخطيطي للترانزستور *JFET* قناة n (ب)، مخطط تصويري للترانزستور *JFET* قناة p (ج)، ورمز تخطيطي للترانزستور *JFET* قناة p (د).

تضخيم الجهد

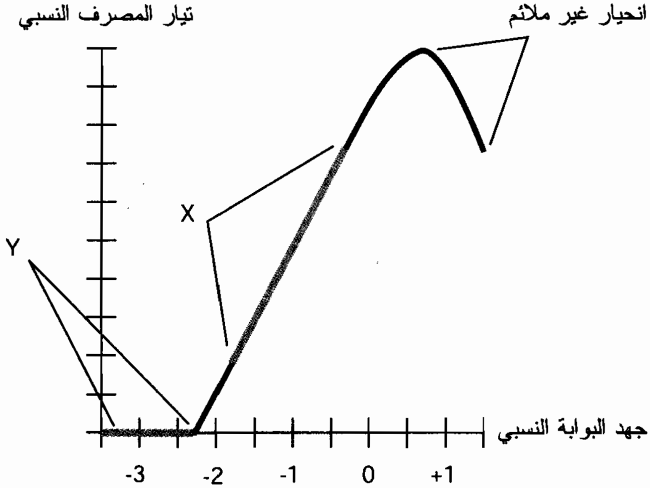
يوضــح الرســم في الــشكل (16-11) تــيار المصرف (القناة)، I_D كتابع لجهد انحياز البوابة E_G لترانزستور JFET افتراضي قناة n عندما لا يكون مُطبَّقا على مسرى البوابة أي إشارة.

عــندما يكون E_G كبيراً إلى حدّ ما وسالباً، يكون JFET مفصوماً، ولا يمر أي تيار في القناة. عندما يصبح E_G أقل سالبية، تفتح القناة ويبدأ التيار بالمرور. تصبح القناة أوسع مع استمرار انخفاض سالبية E_G، ويزداد التيار I_G من النقطة التي يكون فيها جهد الوصلة مصدر–بوابة (S–G) مساوياً لجهد الفتح الأمامي وعــندها تــنقل القــناة بقدر ما تستطيع. إذا أصبح E_G موجباً كفاية بحيث تنقل الوصلة S–G، لن يعمل JFET عــندها بــشكل صــحيح. ينتقل بعض التيار في القناة إلى القاعدة. إن ذلك يشبه تسرب الماء من الخرطوم في الحديقة.

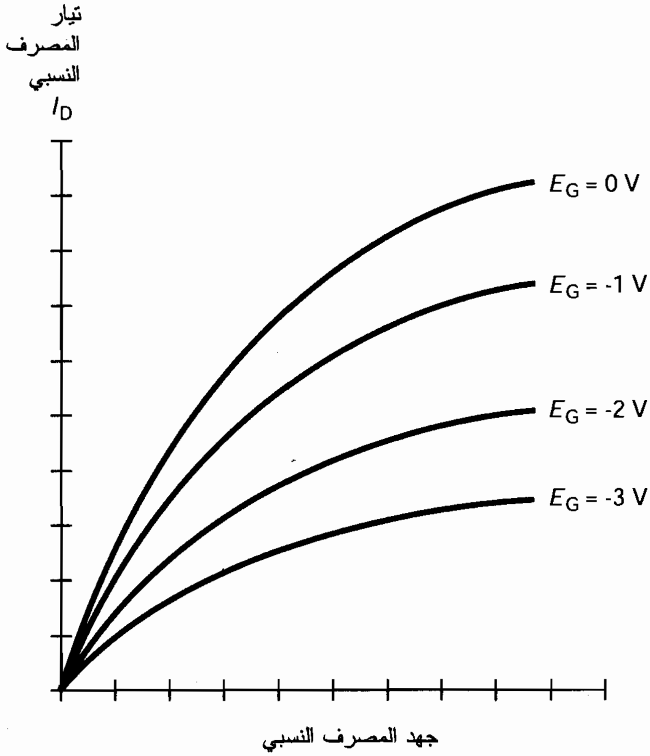
يجــري تضخيم الإشارات الضعيفة بالشكل الأفضل عندما يكون ميل المنحنى في الشكل (16-11) مــنحدراً جداً. إن ذلك موضح تقريباً بالمجال المُشار له بالحرف X في الرسم. بالنسبة لتضخيم الاستطاعة، تكــون النــتائج أفــضل ما يمكن عندما يكون JFET منحازاً أو خلف منطقة الفصم، في المجال المُشار له بالحرف Y.

تيار المصرف بدلالة جهد المصرف

يمكــن رسم تيار المصرف I_D كتابع لجهد المصرف E_D من أجل قيم متعددة لجهد انحياز البوابة E_G. تدعــى مجمــوعة المنحنيات الناتجة *بعائلة منحنيات خصائص الجهاز*. يوضح الشكل (16-12) عائلة من منحنــيات خــصائص ترانزستور JFET افتراضي قناة n. يوضح أيضاً منحنى I_D بدلالة E_G، لأحد الأمثلة الموضحة في الشكل (16-11).



الشكل (16-11): تيار المصرف النسبي كتابع لجهد البوابة لترانزستور *JFET* افتراضي قناة *n*.



الشكل (16–12): عائلة من منحنيات الخصائص لترانزستور *JFET* افتراضي قناة *n*.

الناقلية المتبادلة

عُد للخلف للحظة تضخيم التيار الديناميكي للترانزستورات ثنائية القطبية والذي ناقشناه سابقاً في هذا الفصل. يدعى مماثله في JFET *بالناقلية التبادلية الديناميكية أو الناقلية المتبادَلة*.

عُد إلى الشكل (16–11). افترض أن قيمة معينة للجهد E_G تُنتج تيار I_D مرافق. إذا تغيّر جهد البوابة بكمية صغيرة ΔE_G، سيزداد إذاً تيار المصرف بزيادة معينة ΔI_D. الناقلية المتبادَلة هي النسبة $\Delta I_D/\Delta E_G$. هندسياً، تُمثّل هذه النسبة ميل المستقيم المماس للمنحنى في الشكل (16–11) في بعض النقاط.

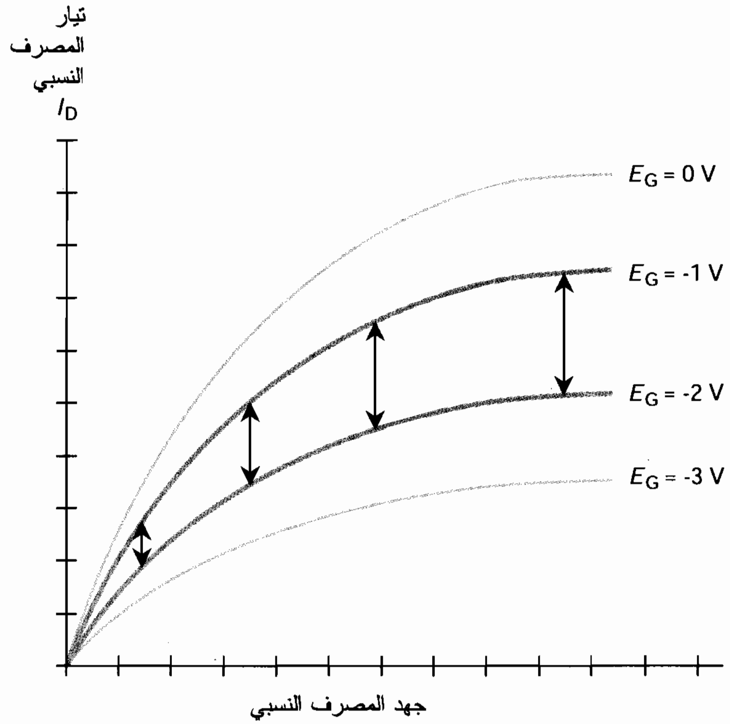
ليست القيمة $\Delta I_D/\Delta E_G$ نفسها في أي نقطة من المنحنى. عند انحياز JFET خلف منطقة الفصم، كما في المنطقة Y في الشكل (16–11)، يكون ميل المنحنى صفراً. ولا يوجد تيار مصرف، حتى لو تغيّر جهد البوابة. سيتغير I_D بتغيّر E_G فقط عندما تنقل القناة بعض التيار. إن المنطقة التي تكون فيها الناقلية المتبادَلة أعظم ما يمكن هي المنطقة المُشار إليها X، حيث يكون ميل المنحنى أشد انحداراً. إنه المكان الذي يمكن الحصول فيه على أعظم تضخيم. يُنتج التغير الصغير في E_G تغيّراً كبيراً في I_D، والذي يسبب بدوره تغيّراً كبيراً في الحمل المقاوم الموضوع على التسلسل مع الخط الواصل بين المصرف ومُزوِّد القدرة.

مسألة (16−4)

دقِّــق في الشكل (16−12). لاحظ أن المنحنيات الموضحة في الرسم تتباعد كثيراً عند زيادة جهد المــصرف E_D (أي، عــند انتقالها باتجاه اليمين). نقدّر استقرائياً من هذا الرسم أنه إذا تجاوز E_D مستوى معيناً، تصبح المنحنيات عبارة عن خطوط أفقية، وأنها لا تمتد أطول من ذلك. ماذا يمكننا أن نستنتج من قدرة JFET على تضخيم الإشارات عندما يزداد E_D بشكل غير محدد؟

حل (16−4)

عــند تــشغيل JFET بجهود مصرف منخفضة نسبياً، يُنتج جهد إشارة pk−pk معين للبوابة (ولنقل −2 إلى −1 V) تغيّراً صغيراً في تيار المصرف I_D. بزيادة E_D، يتزايد البعد بين المنحنيات الممثلة بجهود الــبوابة $E_G = -2$ V و $E_G = -1$ V؛ وذلك يعني أنه ستنتج إشارة الدخل نفسها مع تغيّر كبير في I_D. ويُترجم ذلك إلى تضخيم أكبر. باستمرار زيادة E_D تستوي المنحنيات الممثلة بالجهود $E_G = -2$ V و $E_G = -1$ V، ويــصبح التباعد بينهما ثابتاً. لا يزداد مُعامل التضخيم بشكل كبير عندما يتجاوز E_D هذه القيمة الحدية. إن ذلك موضح في الشكل (16−13). سيحدث الشيء نفسه لجميع إشارات ac ذات الجهــود pk−pk الصغيرة نسبياً والتي تقع ضمن المجالات المشار إليها بواسطة المنحنيات. بالطبع يــوجد نهايــة لكــل هذا. إذا أصبح E_D كبيراً جداً، سيتضرر الجهاز فيزيائياً. جرى تصميم معظم ترانزستورات JFET للعمل بحيث لا تتجاوز قيم E_D بضع عشرات من الفولتات.



الشكل (16−13): توضيح للمسألة (16−4).

MOSFET

MOSFET هي كلمة مؤلفة من أوائل مجموعة الكلمات التالية *metal–oxide–Semiconductor field–effect transistor*. يوضح الشكل (16-14-أ) والشكل (16-14-ب) رسماً مقطعياً مبسطاً لترانزستور MOSFET قناة *n* ورمزه التخطيطي. يوضح الشكل (16-14- ج) والشكل (16-14- د) الترانزستور قناة *p*.

عندما جرى تطوير MOSFET لأول مرة، كان يدعى الترانزستور *FET* ذا البوابة المعزولة أو *IGFET*. ربما يُعتبر ذلك أكثر توصيفاً من الاسم المقبول حالياً. إن مسرى البوابة معزول فعلياً، بواسطة طبقة عازلة كهربائية، تعزلها عن القناة. كنتيجة لذلك، تكون مقاومة الدخل مرتفعة جداً (وبالتالي الممانعة). لا يستجر MOSFET تياراً من مُزوِّد إشارة الدخل. يُعتبر ذلك مفيداً في مُضخِّمات الإشارة –الضعيفة.

المشكلة الرئيسية

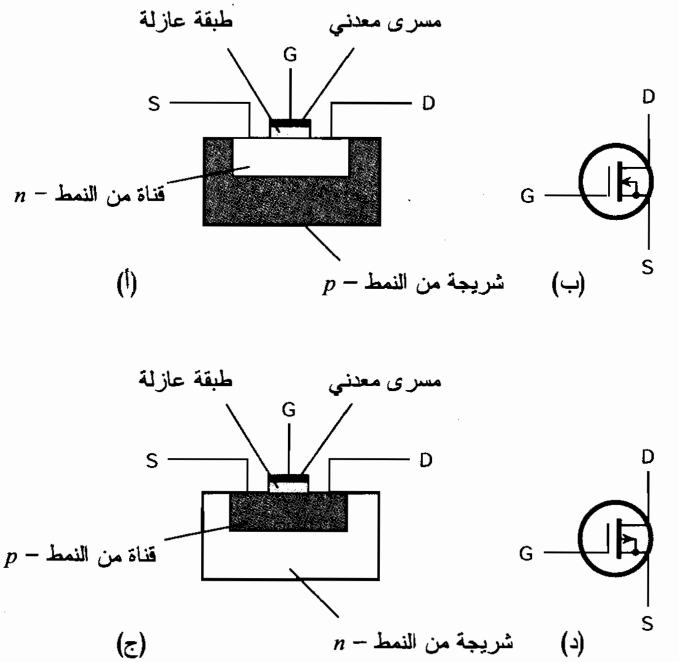
إن المشكلة الرئيسية في ترانزستورات MOSFET هي إمكانية تضررها بسهولة بواسطة التفريغ الإلكتروستاتيكي. عند بناء أو تخديم الدارات التي تحتوي على أجهزة MOS، يجب أن يستخدم التقنيون معدات خاصة للتأكد من أن أيديهم لا تحمل شحنات كهربائية ساكنة (إلكتروستاتيكية) قد تدمر المُكوِّنات. إذا حدث تفريغ كهربائي في العازل الكهربائي في جهاز MOS، سُيدمَّر المُكوِّن بشكل دائم. لا تحمي البيئة الرطبة من هذا الخطر.

المرونة

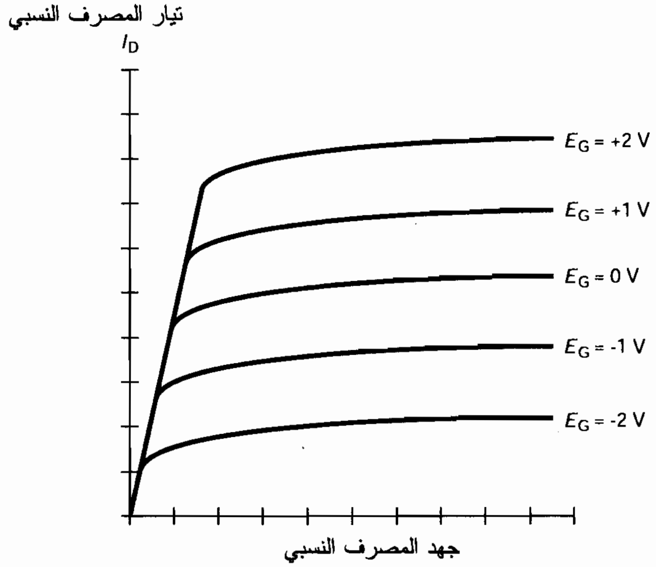
يمكن في الدارات العملية في بعض الأحيان استبدال الترانزستور JFET قناة *n* بترانزستور MOSFET قناة *n*؛ ويمكن بشكل مشابه تبادل الأجهزة ذات القناة *p*. ولكن، ليست المنحنيات المُميِّزة لترانزستورات MOSFET نفسها المنحنيات المُميِّزة لترانزستورات JFET. ليست وصلة مصدر - بوابة (*S–G*) في MOSFET وصلة *p–n* نفسها. لا يوجد جهد فتح أمامي تحت أي ظروف. إذا كانت هذه الوصلة تنقل فإن ذلك بسبب أن جهد *S–G* كبيرٌ جداً بحيث يؤدي لحدوث القوس الكهربائي، متلفاً MOSFET بشكل دائم. يوضح الشكل (16-15) عائلة المنحنيات المُميِّزة لترانزستور MOSFET افتراضي قناة *n*.

الاستنفاذ مقابل التعزيز

تنقل القناة في JFET بانحياز صفر، أي، عندما يكون فرق الكمون بين البوابة والمصدر صفراً. بزيادة منطقة الاستنفاذ، تمر حوامل الشحنة في قناة ضيقة. يُدعى ذلك *بنمط الاستنفاذ*. يمكن أن يعمل MOSFET بنمط الاستنفاذ أيضاً. توضح الرسومات والرموز التخطيطية في الشكل (16-14) نمط الاستنفاذ في ترانزستورات MOSFET.



الشكل (16–14): مخطط تصويري لترانزستور *MOSFET* قناة n (أ)، رمز تخطيطي لترانزستور *MOSFET* قناة n (ب)، مخطط تصويري لترانزستور *MOSFET* قناة p (ج)، رمز تصويري لترانزستور *MOSFET* قناة p (د).



الشكل (16–15): عائلة المنحنيات المُميِّزة لترانزستور *MOSFET* افتراضي قناة n.

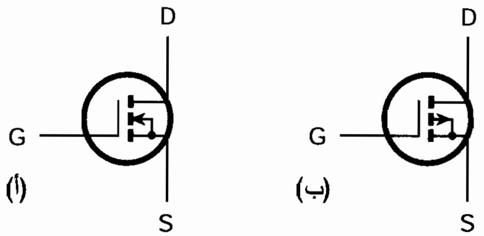
تُتيح تكنولوجيا معدن-أوكسيد-نصف ناقل نمطاً آخر للتشغيل. يمتلك ترانزستور MOSFET *بنمط التعزيز* قناة مفصومة بانحياز صفر. من الضروري تطبيق جهد انحياز E_G على البوابة، يكون التيار I_D صفراً عند عدم وجود دخل إشارة. يوضح الشكل (16-16) الرموز التخطيطية للأجهزة بنمط التعزيز قناة n وقناة p. يمكن في المخططات التخطيطية التمييز بين نمط التعزيز ونمط الاستنفاذ من خلال النظر إلى الخطوط العامودية داخل الدوائر. لترانزستورات MOSFET بنمط الاستنفاذ خطوط عامودية مستمرة؛ أما ترانزستورات MOSFET بنمط التعزيز فلها خطوط عامودية مُقطّعة.

الدارات المتكاملة

تبدو معظم الدارات المتكاملة (ICs) كعلب بلاستيكية بأرجل معدنية بارزة. تكون التكوينات الأساسية عبارة عن *علب بصف واحد من الأرجل* (SIP)، *وعلب بصفين من الأرجل* (DIP) *والعلبة المسطحة*. تبدو بعض العلب الأخرى مشابهة للترانزستور مع وجود أرجل كثيرة. تدعى هذه العلبة التي يمكن أن تكون معدنية في بعض الأحيان *بالعلبة T.O*. الرمز التخطيطي للدارة المتكاملة عبارة عن مثلث أو مستطيل مع كتابة مُحدِّد المُكوِّن داخله.

الدمج

إن نظم وأجهزة الدارات المتكاملة صغيرة جداً مقارنة بالدارات المكافئة المصنوعة من مُكوِّنات منفصلة. يمكن باستخدام الدارات المتكاملة بناء دارات أكثر تعقيداً مع الإبقاء عليها بحجم معقول وذلك مقارنة مع المُكوِّنات المنفصلة. لذلك، مثلاً، توجد كمبيوترات صغيرة ذات قدرات متقدمة أكثر من الكمبيوترات الأولى التي بُنيت في منتصف القرن العشرين والتي كانت بحجم غرف بكاملها.



الشكل (16-6): (أ) رمز ترانزستور *MOSFET* قناة n بنمط التعزيز.
(ب) رمز الترانزستور *MOSFET* قناة p بنمط التعزيز.

سرعة عالية

تكون الوصلات الداخلية بين المُكوِّنات في الدارة المتكاملة صغيرة جداً فيزيائياً، لتسمح بحدوث التبديل بسرعات عالية. تنتقل التيارات الكهربائية بسرعة، ولكن السرعة ليست آنية. كلما كان انتقال

حوامل الشحنة من مُكوِّن لآخر أسرع، كلما أمكن إنجاز عمليات أكثر بوحدة الزمن، وكلما انخفض الزمن المطلوب لإنجاز المهمات المعقدة.

متطلبات قدرة منخفضة

تستهلك الدارات المتكاملة عموماً قدرة منخفضة مقارنة بالدارات ذات المُكوِّنات المنفصلة. يُعتبر ذلك هاماً في حال استخدام البطاريات. بسبب استجرار ICs لتيار صغير جداً، فإنها تنتج حرارة أقل من مكافئاتها من دارات المُكوِّنات المنفصلة. يزيد ذلك من مردود الطاقة ويُصغِّر المشاكل التي تحصل في المعدات نتيجة ارتفاع حرارتها أثناء الاستخدام، كانحراف التردد وتوليد ضجيج داخلي.

الوثوقية

إن إخفاق النظم التي تستخدم ICs أقل عادةً لكل ساعة استخدام للمُكوِّن مقارنة بالنظم التي تستخدم المُكوِّنات المنفصلة. يحدث ذلك غالباً لأن جميع الوصلات الداخلية معزولة ضمن صندوق IC، والذي يمنع التآكل أو دخول الغبار. يُترجَم معدل الإخفاق المنخفض إلى زمن إخفاق أقل.

تُخفِّض تكنولوجيا IC تكاليف الخدمة بسبب بساطة إجراءات الإصلاح عند حدوث الإخفاقات. يستخدم العديد من النظم مغارز من أجل ICs، والاستبدال ببساطة هو مسألة إيجاد IC التالفة، ونزعها ووصل واحدة جديدة. تُستخدم معدات خاصة لإزالة اللحام لتخديم لوحات الدارات التي تحوي ICs ملحومة مباشرة بالرقاقة المعدنية.

بناء الدارات المتوسطة

تُوظِّف أدوات IC الحديثة في *بناء الدارات المتوسطة*. تُنجز ICs كل على حدة وظائف محددة في لوحة الدارة؛ تُركَّب لوحة الدارة أو البطاقة، بدورها، في مغرز ويكون لها هدف محدد. تُستخدم الكمبيوترات المبرمجة ببرمجيات خاصة من قبل التقنيين لاكتشاف البطاقة ذات الخلل في النظام. يمكن سحب البطاقة واستبدالها، وإعادة النظام للمستخدم في أقصر زمن ممكن.

امتحان موجز

عد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. يستطيع ترانزستور JFET المنحاز خلف منطقة الفصم العمل
   (a) كمُضخِّم قدرة.
   (b) كلوحة شمسية.

(c) كليزر حقن.

(d) لا يخدم كأي مما ورد أعلاه.

2. عندما تصبح منطقة الاستنفاذ في JFET أوسع،

(a) تزداد سعة القناة.

(b) تنخفض سعة القناة.

(c) تنقل القناة تياراً بشكل أقل.

(d) تنقل القناة تياراً بشكل أكبر.

3. املأ الفراغ في الجملة التالية لتكون صحيحة."___________ في الترانزستور ثنائي القطبية هو التردد الذي يصبح ربح التيار عنده مساوياً الوحدة في دارة مؤرضة الباعث."

(a) الفتح الأمامي.

(b) سعة الوصلة.

(c) القطع ألفا.

(d) ربح عرض المجال (gain bandwidth product).

4. يبلغ ربح التيار في ترانزستور ثنائي القطبية، في شروط مثالية، 16.0 بتردد تشغيل يبلغ 1,000 Hz. تم تحديد تردد القطع ألفا 600 kHz. ما هو أكبر ربح ممكن للتيار يمكن أن نحصل عليه من الجهاز في التردد 75 MHz؟

(a) 11.3

(b) 16.0

(c) 22.6

(d) لا يمكن تحديده من هذه المعلومات.

5. في الوصلة p–n لديود ينقل بالاتجاه الأمامي،

(a) يكون نصف الناقل من النمط n دائماً مشبعاً.

(b) تكون الحوامل الأكثرية عبارة عن إلكترونات.

(c) تكون المادة من النمط p مشحونة إيجابياً بالنسبة للمادة من النمط n.

(d) يكون المُجمِّع مشحوناً إيجابياً بالنسبة للقاعدة.

6. جهاز بنمط التعزيز

(a) ينقل بشكل جيد في الانحياز صفر.

(b) يضخم بشكل أفضل عندما تكون الوصلة $p - n$ في حالة إشباع.

(c) يمكن استبداله بجهاز بنمط الاستنفاذ إذا عُكست القطبية.

(d) لا يقوم بأي مما ورد أعلاه.

7. ســتة ديــودات ســيليكونية، جهد الفتح الأمامي لكل منها 0.60 V، تم وصل هذه الديودات على التفرع، مع توجيه جميع الوصلات p–n بالاتجاه نفسه. ما هو جهد الفتح الأمامي للتركيب؟

(a) 0.60 V

(b) 0.10 V

(c) 3.60 V

(d) لا يمكن تحديده من هذه المعلومات.

8. المسار بين المصدر والمصرف في ترانزستور JFET

(a) ينقل دائماً.

(b) يدعى بالقناة.

(c) يدعى بمنطقة الاستنفاذ.

(d) لا ينقل أبداً.

9. يمكن أن يتصرف الترانزستور *pnp* كمُضخِّم تيار عندما تؤدي التغيّرات الصغيرة

(a) في تيار القاعدة لإنتاج تغيرات كبيرة في تيار المُجمِّع.

(b) في جهد القاعدة لإنتاج تغيرات كبيرة في جهد المُجمِّع.

(c) في تيار المصدر لإنتاج تغيرات كبيرة في تيار القاعدة.

(d) في جهد القاعدة لإنتاج تغيرات كبيرة في تيار المصرف.

10. عــندما تكون وصلة ترانزستور p–n ثنائي القطبية منحازة عكسياً والجهد يزداد إلى اللانهاية، أخيراً فإن الوصلة

(a) ستتصرف كناقل.

(b) ستتضخم.

(c) ستتصرف كمقاومة.

(d) ستنقل.

اختبار: الباب الثاني

لا تعــد إلى الــنص عــند تقديم هذا الاختبار. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن 37 سؤالاً بشكل صــحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب. يُفضَّل أن يكون لديك صديق يقوم بتدقيق الأجوبة في المــرة الأولى لــتقديمك الاختــبار وبالتالي لن تتذكر الأجوبة، ويمكنك تقديم الامتحان مرة أخرى إذا رغبت.

1. وفقاً لقانون الجهد لكيرشوف يكون
   (a) مجموع الجهود في أي فرع في دارة dc يساوي صفراً.
   (b) التيار في دارة dc تسلسلية يساوي الجهد مقسوماً على الاستطاعة.
   (c) الاستطاعة في دارة dc تفرعية تساوي الجهد مقسوماً على التيار.
   (d) الجهد في أي دارة dc يساوي الاستطاعة مقسومةً على المقاومة.
   (e) الجهد في أي دارة dc تسلسلية يساوي مربع المقاومة مقسوماً على الاستطاعة.
2. افترض أن حلقة بنواة هوائية مُكوَّنة من لفة واحدة تمر فيها كمية معينة من dc. إذا تضاعف عدد لفات الحلقة بينما بقي التيار نفسه، فالقوة المحركة المغنطيسية
   (a) تنخفض إلى ربع القيمة السابقة.
   (b) تنخفض إلى النصف.
   (c) لا تتغير.
   (d) تتضاعف.
   (e) تصبح أربعة أضعاف.
3. المادة العازلة مغنطيسياً
   (a) نفاذيتها صفر.
   (b) نفاذيتها أقل من 1.

(c) نفاذيتها تساوي 1.

(d) نفاذيتها أكبر من 1.

(e) يمكن أن يكون لها أي نفاذية.

4. تُحدَّد الناقلية بوحدات تدعى

(a) الأوم.

(b) الفاراد.

(c) الهنري.

(d) السيمنـــز.

(e) الكولون.

5. افتـــرض أنـــه يمر في ملف تيار dc قيمته 100 mA، ثم خُفِّض هذا التيار إلى 10 mA. افترض أن بقية العوامل بقيت نفسها. إن شدة الحقل المغنطيسي داخل وحول الملف

(a) لا تتغير.

(b) تصبح 1 بالمائة من القيمة الأولى.

(c) تصبح 10 بالمائة من القيمة الأولى.

(d) تصبح 10 أضعاف القيمة الأولى.

(e) تتغير، ولكن إلى مدى لا يمكننا تحديده إذا لم يكن لدينا المزيد من المعلومات.

6. إذا بقيت العوامل الأخرى ثابتة، فإن السعة بين زوج من الصفائح المعدنية المتطابقة المسطحة المتوازية

(a) تزداد بزيادة مساحة سطح الصفائح.

(b) لا تتغيّر بزيادة مساحة سطح الصفائح.

(c) تتناقص بزيادة مساحة سطح الصفائح.

(d) تعتمد على الجهد المطبق على الصفائح.

(e) تعتمد على التيار المتدفق بين الصفائح.

7. يبلغ جهد القمة الموجبة لموجة ac معينة +10.0 V، ويبلغ جهد القمة السالبة -5.00 V. ما هو الجهد من القمة-إلى-القمة؟

(a) +5.00 V

(b) 5.00 V

(c) −5.00 V

(d) 15.0 V

(e) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

8. ماذا يحدث لتحريض ملف إذا وُضعت نواة فيرومغنطيسية داخله؟

(a) ينخفض التحريض.

(b) يبقى نفسه.

(c) ينقص.

(d) قد يزداد أو ينقص اعتماداً على التردد.

(e) لا يمكن قول أي شيء.

9. أي من التالي لا يحتوي على وشيعة؟

(a) الجرس الرنان.

(b) مغنطيس كهربائي.

(c) ريلاي.

(d) مُحرِّض.

(e) مُكثِّف.

10. الغاز المؤين

(a) سام وذو نشاط إشعاعي.

(b) يمكن أن يكون ناقلاً معتدلاً للكهرباء.

(c) له العديد من البروتونات في نوى ذراته.

(d) له العديد من النترونات في نوى ذراته.

(e) له العديد من الإلكترونات في نوى ذراته.

11. تحدث الأورورا ("الأضواء الشمالية" أو "الأضواء الجنوبية") بشكل غير مباشر نتيجة

(a) الريح المغنطيسية الأرضية.

(b) حقول كهرطيسية من صنع الإنسان.

(c) حركة الكواكب حول الشمس.

(d) قذف الغلاف الجوي العلوي للأرض بالنيازك.

(e) الانفجارات الشمسية.

12. افترض أن تحريض ملف بنواة هوائية يساوي 10.0 μH في التردد 2.00 MHz. ما هو تحريض الملف نفسه إذا تضاعف التردد إلى 4.00 MHz؟

(a) 10.0 μH

(b) 20.0 μH

(c) 5.00 μH

(d) 40.0 µH
(e) 2.50 µH

13.يبلغ تردد موجة راديو معينة 0.045 GHz. الشكل الأكثر احتمالاً للتعبير عنه

(a) 45 Hz.
(b) 450 Hz.
(c) 45 kHz.
(d) 450 kHz.
(e) لا يمكن التعبير عنه بأي شكل من الأشكال الواردة أعلاه.

14.بزيادة تردد جهد ac المُطبَّق على مُكثِّف، سنصل أخيراً إلى نقطة يتصرف المُكثِّف عندها، بالنسبة إلى ac،

(a) كمقاومة.
(b) كمُحرِّض.
(c) كدارة مفتوحة.
(d) كدارة مقصورة.
(e) كديود.

15.تتكون الممانعة العقدية من

(a) مقاومة ومفاعلة.
(b) ناقلية ومقاومة.
(c) تحريض وسعة.
(d) ناقلية وتحريض.
(e) ناقلية وسعة.

16.مقاومة قيمتها 220 أوم وتنقل تياراً مستمراً قيمته 100 mA. يكون الجهد عبر المقاومة

(a) 22 kV.
(b) 2.2 V.
(c) 22.0 V.
(d) 0.22 V.
(e) يستحيل حسابه من هذه المعلومات.

17.الخلية الكهرضوئية

(a) خلية كهركيميائية قابلة لإعادة الشحن.
(b) تستخدم كمُكثِّف متغير.

(c) تُوِّلد dc عندما يرتطم الضوء المرئي بوصلة $p - n$ الخاصة بها.

(d) تضيء عند انحيازها عكسياً.

(e) مفيدة كمُنظِّم جهد.

18. يمكن التعبير عن كثافة التدفق المغنطيسي بدلالة

(a) خط بالقطب.

(b) خط بالسنتيمتر.

(c) خط بالمتر المربع.

(d) خط بالمتر المكعب.

19. في الترانزستور ثنائي القطبية، ماذا يحدث للتضخيم الأعظم الممكن الحصول عليه عندما يصبح تردد التشغيل أعلى وأعلى؟

(a) يزداد.

(b) يزداد لقيمة معينة ثم يستوي.

(c) لا يتغير.

(d) يتناقص.

(e) يتناقص إلى الصفر ثم يصبح سالباً.

20. المقاومات على التفرع

(a) تُجمع مع بعضها مباشرةً.

(b) تُجمع مع بعضها كالسعات على التسلسل.

(c) تُجمع مع بعضها كما يُجمع التحريض على التسلسل.

(d) تستجر جميعها الكمية نفسها من التيار بغض النظر عن القيم الأومية على حدة.

(e) تبدو جميعها الكمية نفسها من القدرة بغض النظر عن القيم الأومية لكل مقاومة على حدة.

21. أي من التالي يشكل اختلافاً عاماً بين دارة ترانزستور *pnp* ثنائي القطبية ودارة ترانزستور *npn* ثنائي القطبية؟

(a) ترددات التشغيل مختلفة.

(b) قدرات معالجة التيار مختلفة.

(c) تعرض الأجهزة أنماطاً متعاكسة للمفاعلة.

(d) تعرض الأجهزة ممانعات مختلفة.

(e) قطبيات مُزوِّد القدرة متعاكسة.

22. افترض أنك تقرأ ورقة تقنية عن إشارتي ac ترددامما متطابقة، وأشكالهما الموجية متطابقة، وجهود

القمة السالبة مساوية لجهود القمة الموجبة. أُخبرت أيضاً أن الإشارات ذات تطابق في الطور. يمكن أن تستنتج من ذلك أن الجهد من القمة-إلى-القمة للإشارة المُركّبة هو

(a) ضعف الجهد من القمة-إلى-القمة لكل إشارة على حدة.

(b) هو نصف الجهد من القمة-إلى-القمة لكل إشارة على حدة.

(c) 1.414 الجهد من القمة-إلى-القمة لكل إشارة على حدة.

(d) 2.828 الجهد من القمة-إلى-القمة لكل إشارة على حدة.

(e) تحتوي الورقة على خطأ.

23. يعتمد عرض القناة في JFET على

(a) جهد البوابة.

(b) تيار القاعدة.

(c) القطع ألفا.

(d) بيتا.

(e) تيار المجمع.

24. السعة الآنية لموجة ac هي

(a) السعة مقاسة أو مُحدّدة في لحظة زمنية معينة.

(b) متوسط السعة لأي عدد من دورات الموجة الكاملة تماماً.

(c) تساوي تقريباً 0.707 أضعاف سعة القمة.

(d) تساوي تقريباً 1.414 أضعاف سعة القمة.

(e) ثابتة بمرور الزمن.

25. في المغنطيس الكهربائي،

(a) يُمغنط التيار المار مؤقتاً في الملف النواة.

(b) يتناوب الحقل الكهربائي باستمرار.

(c) تتناسب قوة الحقل عكسياً مع التيار.

(d) تكون خطوط التدفق المغنطيسي جميعها مستقيمة.

(e) يوجد قطب واحد فقط.

26. ماذا يحدث عندما تنحاز وصلة باعث- قاعدة (E–B) لترانزستور ذي تأثير فعلي (FET) عكسياً؟

(a) يتدفق تيار كبير.

(b) يكون FET فعالاً بشكل مثالي.

(c) تكون المفاعلة صفراً.

(d) يمكن استخدام الجهاز كمُضخِّم ولكن ليس كمفتاح تبديل (قاطعة).

(e) إنه سؤال لا معنى له! لا يوجد ترانزستور FET يحوي وصلة $E–B$.

27. افتـــرض أنك قرأت ورقة تقنية فيها موجتان جيبيتان خاصتان ترددالهما مختلفة ولكنهما متطابقتان في الطور. نستنج أن

(a) زاوية الطور 0^o.

(b) زاوية الطور 180^o.

(c) زاوية الطور $+90^o$.

(d) زاوية الطور -90^o.

(e) تحتوي الورقة على خطأ.

28. خمسة مُكثِّفات سعة كل منها 110 pF وُصلت على التفرع. كم تكون السعة الكلية؟

(a) 20 pF.

(b) 100 pF.

(c) 500 pF.

(d) تعتمد على التردد.

(e) تعتمد على الجهد.

29. ميكـــرفون "حُـــددت ممانعته 500 أوم". يعني المهندسون أنه جرى تصميم الميكرفون للعمل أفضل ما يمكن بدارة ممانعتها العقدية

(a) 0 + j 500.

(b) 0 − j 500.

(c) 300 + j 400.

(d) 300 − j 400.

(e) 500 + j0.

30. تم وصل أربع مقاومات موصولة على التسلسل. تبلغ قيمة ثلاث منها 100 أوم؛ وقيمة المقاومة الرابعة مجهولة. يتم وصل بطارية 6.00 v على التسلسل مع التركيب، ليمر تيار في الدارة قيمته 10.0 mA. ما هي قيمة المقاومة المجهولة؟

(a) 300 أوم

(b) 600 أوم

(c) 900 أوم

(d) 1,200 أوم

(e) لا يمكن حسابها من هذه المعلومات.

31. الاحتمال الأكبر لإيجاد الشريط المغنطيسي في

(a) مُضخِّم ترانزستوري.

(b) نظام خزن بيانات كمبيوتري عالي – السعة.

(c) مُشغِّل قرص مُدمج ذي دقة متناهية.

(d) سواقة القرص الصلب الكمبيوترية.

(e) ولا أي مما سبق؛ لم يعد الشريط المغنطيسي مستخدماً أبداً.

32. أي من التالي ليس من موجودات الدارات المتكاملة؟

(a) متطلبات القدرة المنخفضة.

(b) الوثوقية الممتازة.

(c) الحجم الفيزيائي كبير.

(d) سهولة الصيانة.

(e) Modular construction.

33. يبلغ التردد الزاوي لموجة ac معينة 450 rad/s. ما هو التردد بالكيلو هرتز؟

(a) 0.716 kHz

(b) 0.450 kHz

(c) 0.0716 kHz

(d) 71.6 kHz

(e) 2,830 kHz

34. في الفاركتر

(a) تتغير المقاومة مع التيار.

(b) لا تنقل الوصلة p–n عندما تكون منحازة أمامياً.

(c) تتغير السعة مع الجهد العكسي المُطبَّق.

(d) يعتمد التحريض على التيار العكسي.

(e) يكون جهد الانهيار حوالى 0.3 V.

35. عندما يكون لموجتين ترددان متطابقان وكانتا متعاكستين بالطور، فإنهما منـــزاحتان تقريباً بمقدار

(a) 0.785 راديان.

(b) 1.57 راديان.

(c) 3.14 راديان.

(d) 6.28 راديان.

(e) كمية لا يمكن تحديدها إذا لم يجر تقديم المزيد من المعلومات.

36. تبلغ مقاومة مُكوِّن مُعيَّن 50 أوم وقيمة مفاعلته 70- أوم. الممانعة العقدية هي

(a) $j70 + 50$.

(b) $j70 - 50$.

(c) $j70 + 50-$.

(d) $j70 - 50-$.

(e) يستحيل تحديدها دون المزيد من المعلومات.

37. وُصلت ثلاثة مصابيح ضوئية على التفرع مع بطارية V-12.0. يستهلك المصباح الأول استطاعة مقدارها W 5.00، ويستهلك المصباح الثاني استطاعة مقدارها W 15.0، ويستهلك المصباح الثالث استطاعة مقدارها W 20.0. ما هو التيار المار في المصباح الثالث؟

(a) mA 139.

(b) mA 600.

(c) A 1.67.

(d) A 7.20.

(e) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

38. في ترانزستور JFET قناة *n*، عندما يصبح جهد البوابة سالباً وسالباً أكثر، نصل أخيراً إلى نقطة

(a) تنقل القناة التيار بقدر ما تستطيع.

(b) لا تنقل القناة التيار.

(c) يصبح مُعامل التضخيم مستوياً.

(d) يصل الجهاز لحالة الإشباع.

(e) يصبح المُعامل بيتا مساوياً 1.

39. في ديود منحاز عكسياً حيث جهد dc المطبق أصغر من جهد الانهيار يكون،

(a) التيار في الوصلة *p–n* صفراً.

(b) التيار في الوصلة *p–n* مرتفعاً.

(c) تتدفق الإلكترونات من المادة من النمط *p* إلى المادة من النمط *n*.

(d) تتدفق الإلكترونات من المادة من النمط *n* إلى المادة من النمط *p*.

(e) تتدفق الإلكترونات والثقوب باتجاه واحد.

40. إذا أُخبرت أن الموجة *X* ترشد الموجة *Y* بمقدار 225°، سيكون من الأفضل أن تقول

(a) تتأخر الموجة *X* عن الموجة y بـــ 135°.

(b) تتأخر الموجة X عن الموجة y بـ $45°$.

(c) الموجة X ترشد الموجة y بـ $45°$.

(d) الموجة X والموجة Y متعاكستان بالطور.

(e) الموجة X والموجة Y متوافقتان بالطور.

41. افترض أنه تم وصل ثلاثة مُحرِّضات على التسلسل. افترض أيضاً عدم وجود تحريض مُتبادل بينها ويستطيع كل منها إبداء مقاومة $0 + j300$ عند التردد 500 kHz. تخيل أيضاً ثلاثة من المُحرِّضات عبارة عن ملفات مصنوعة من سلك من ناقل مثالي؛ أي جميعها مقاومتها صفر. ما هي الممانعة العقدية للتركيب الموصول تسلسلياً عند التردد 500 kHz؟

(a) $0 + j100$.

(b) $0 - j100$.

(c) $0 + j900$.

(d) $0 - j900$.

(e) يستحيل تحديد الممانعة العقدية دون معرفة المزيد من المعلومات.

42. تخيل دارة dc يمر فيها تيار مقداره I أمبير، وفيها مُزوِّد emf قيمته E فولت، ومقاومتها R أوم حيث الاستطاعة المبددة بالوات P. أي الصيغ التالية خاطئة؟

(a) $P = I^2R$

(b) $E = IR$

(c) $R = E/I$

(d) $P = E^2/R$

(e) $I = ER$

43. يبلغ تيار إشارة دخل rms ac لمُضخِّم بترانزستور ثنائي القطبية 10.0 µA، ويبلغ القطع ألفا للجهاز 100 kHz. ما هو تيار إشارة خرج rms ac؟

(a) 10.0 mA

(b) 10.0 µA

(c) 0.100 µA

(d) 0.00100 µA

(e) لا يمكن حسابه دون معرفة المزيد من المعلومات.

44. تتكون دارة dc بسيطة من بطارية 12-V ومصباح مقاومته 144 Ω عند وصلها ببطارية وعند توهج المصباح. ما هو مقدار الاستطاعة المُبددة بواسطة المصباح؟

(a) 83 mW

(b) 1.0 W
(c) 12 W
(d) 1.7 kW
(e) 21 kW

45. في موجة ac المستطيلة،

(a) تحدث عمليات عبور السعة بشكل آني.
(b) تصبح السعة أكثر إيجابية بمعدل ثابت، وتصبح أكثر سالبية بشكل آني.
(c) تصبح السعة أكثر سالبية بمعدل ثابت، وتصبح أكثر إيجابية بشكل آني.
(d) تتغير السعة سلباً وإيجاباً بمعدل ثابت.
(e) يبدو الشكل الموجي كتابع الجيب الرياضي.

46. يقال أيضاً عن الممانعة المقاومة الصرفة إنها

(a) غير ناقلة.
(b) غير سعوية.
(c) غير تحريضية.
(d) غير تفاعلية.
(e) تخيلية صرفة.

47. السعة المتوسطة لموجة ac جيبية صرفة تساوي

(a) سعة القمة نفسها.
(b) تقرر 0.707 أضعاف سعة القمة تقريباً.
(c) 0.707 أضعاف السعة الآنية تقريباً.
(d) 0.707 أضعاف السعة من القمة – إلى – القمة.
(e) صفر.

48. يُدعى مُبدِّل الطاقة الذي يُحول الحركة الميكانيكية إلى ac

(a) بالمحرك الكهربائي.
(b) بالوشيعة.
(c) بالمغنطيس الكهربائي.
(d) بالمُولِّد الكهربائي.
(e) بالمُحرِّض.

49. تعرف المركبة العامودية للحقل المغنطيسي الأرضي في أي موقع معين

(a) بكثافة التدفق.

(b) بزاوية التدفق.

(c) بالميل الصاعد.

(d) بالميل الهابط.

(e) بالصعود القائم.

50.التيار الاصطلاحي

(a) يتدفق من السالب إلى الموجب.

(b) يتدفق من الموجب إلى السالب.

(c) يتدفق فقط في العوازل المثالية.

(d) لا يمكن أن يتدفق في الغازات المؤينة.

(e) يقاس بالأمبير بالثانية.

الباب الثالث

الأمواج، والجُسيْمات، والفضاء، والزمن

الفصل 17

ظواهر الموجة

الكــون غــارق بالتموجات. يمكن أن تحدث الأمواج بأي طريقة وفي أي وسط نهتم بتخيله. تنتشر الأمــواج في الغــازات، وفي السوائل، وفي الأجسام الصلبة. تتموج الأمواج في كامل أرجاء فضاء-زمن المستمر، وتتموج فيما يبدو غياب أي وسط على الإطلاق. نعتبر كل مما يلي وسطاً

- الهواء أثناء حفلة موسيقية
- سطح البركة بعد سقوط حصاة فيه
- سطح البحيرة في يوم عاصف
- سطح المحيط في شاطئ المافيرك' في كالفورنيا
- السنابل في حقل قمح
- سطح فقاعة صابون عندما تنفخ عليها
- الغيوم العالية بالقرب من جيت ستريم (وهو تيار هوائي سريع وضيق في الغلاف الجوي في أعلى طبقة التروبوسفير في زوايا العرض الجغرافي المتوسطة ويجري أفقياً من الغرب إلى الشرق)
- سطح الأرض أثناء زلزال كبير
- باطن الأرض بعد زلزال كبير
- الدماغ البشري في أي وقت
- وتر القيثارة بعد نقره
- خط القدرة الرئيسية الناقل للتيار المتناوب
- هوائي إرسال راديو أو تلفزيون
- الليف الضوئي الناقل للحزمة الليزرية

- الحقل الكهرطيسي داخل فرن المايكروويف
- فضاء - زمن بالقرب من نجم نيتروني ثنائي ينبثق

إن بعـض ظواهـر الموجة أسهل إدراكاً من البعض الآخر. إذا كان من السهل رؤية الموجة بالعين المجـردة، فذلك ليس شائعاً بالضرورة في الطبيعة. إذا كان من الصعب تصور الموجة، فالموجة ليست نادرة بالضرورة.

الأمواج غير الملموسة

إن أبـسط الأمواج التي نفكر بها هي تلك التي نستطيع إرسالها والإحساس بها. وتشكل أمواج الماء أفـضل مثال. يمكنك أن تشعر بقوة تدفق الأمواج وإيقاعها إذا تجولت على الشاطئ. أمضى إنسان ما قبل الـتاريخ ودون شك ساعات محدقاً بأمواج البحيرات والمحيطات، متعجباً من أين أتت، ولماذا هي كبيرة في بعـض الأحيان وصغيرة في أحيان أخرى، ولماذا تكون منسابة في بعض الأحيان ومائجة في أحيان أخرى، لـماذا تأتي في بعض الأحيان من الغرب وفي أحيان أخرى تأتي من الشمال، ولماذا تتحرك في بعض الأحيان باتجاه الرياح وفي أحيان أخرى تتحرك بعكسها.

تخـيل طفـلاً، قـبل 100,000 سـنة، يرمي حصاة في بركة أو يراقب سمكة تقفز ويلاحظ انبثاق التموجات من الاضطراب تماماً كأمواج المحيط، ولكن بشكل أصغر. يجب أن يكون ذلك كاشفاً للحقيقة، ولكـنه لاشيء مقارنة بالاكتشافات التي حققها العلماء لاحقاً بمساعدة الأجهزة، والرياضيات، وفتنة اللا ملموس.

الأمواج الكهرطيسية

فكّـر بالحقـول الكهرطيسية (EM) التي تولّدها أجهزة البث اللاسلكية. ذكرت مجلة تاريخ الكون الدورية أن هذه الحقول قد وُجدت في الزاوية التي تخصنا من هذا الكون لفترة قصيرة فقط. إن مجرتنا قديمة، ولكن لا يتجاوز زمن بث البرامج التلفزيونية 2×10^{-8} من حياة مجرتنا.

لا تنـشأ الأمـواج التلفزيونية مباشرة من الطبيعة. إنها تُصنَّع بواسطة معدات محددة مبتكرة بواسطة أنواع خاصة من المخلوقات الحية الموجودة على الكوكب الثالث الذي يدور حول نجم متوسط الحجم. ربما تُـولَّد الأمـواج بواسطة أنواع أخرى تعيش على كواكب أخرى تدور حول نجوم أخرى. إذا كان ذلك يحصل، فإننا لم نسمع أي من إشاراتهم لحد الآن.

أمواج الجاذبية

يعـتقد بعـض العلماء بوجود *أمواج الجاذبية* واحتشاد بنية الفضاء بها، تماماً كامتلاء البحر بالأمواج الصغيرة والكبيرة. توجد نظرية تنص على أن الكون المعروف عبارة عن دورة واحدة في نظام مهتز، ودور هذه الموجة كبير بشكل غير قابل للتخيل.

كـــم من الأشخاص يعتقدون بأنهم عبارة عن بُقع بالغة الصغر موجودة على جُسَيْم في فقاعة تتوسع وتضيق في مختبر السماوات؟ ليس كثيراً، ولكن بالنسبة لهؤلاء، وإذا افترضنا أنها موجودة، يستحيل أن نراها بأعيننا وتصعب رؤيتها بأحذق عين مجردة لأن أمواج الجاذبية رباعية الأبعاد.

الأمواج الكاملة

حلـــم المتـــزلجون على الماء بركوب الأمواج الكاملة؛ كافح المهندسون لتركيبها صناعياً. ربما تكون الموجة الكاملة بالنسبة إلى المتزلجين على الماء، "أنبوبية" و"كامدة" وجزءاً من "مجموعة علوية" لموجة في أحد شـــواطئ الـــساحل الشمالي لأوهايو في شهر شباط. الموجة الكاملة في ذهن مهندس الاتصالات عبارة عن منحنى جيبـــي، يدعى أيضاً *بالموجة الجيبية*. ربما تتذكر هذا النمط من الأمواج من الفصل الثالث عشر.

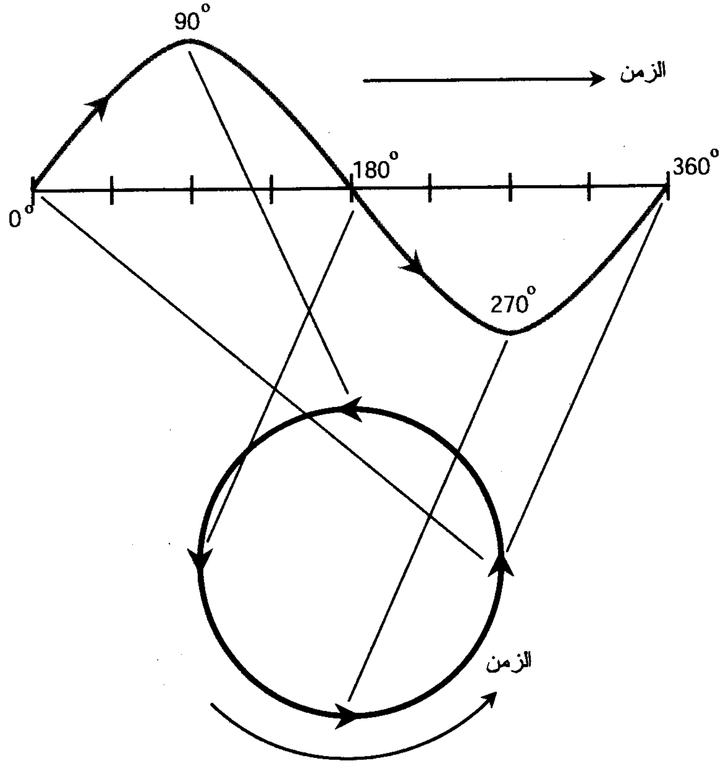
حـــتى بالنـــسبة لشخص لم يسمع أبداً بالتابع الجيبـــي، فإن الشكل الموجي الجيبـــي سهل التذكر. يُنشئ المنحنى الصوتي الجيبـــي ضجة لا تُنسى. إنه يُركِّز الصوت في طول موجي واحد. للمنحنى الجيبـــي البـــصري مظهر لا يمكن نسيانه، إنه يُركِّز الضوء في طول موجي واحد. تستطيع مجموعة كاملة من أمواج المحيط إعطاء المتزلجين ارتعاشاً لا يُنسى، لأنه يُركِّز أيضاً الكثير من الطاقة في طول موجي واحد.

جـــرى في الفصل الثالث عشر تمثيل الموجة الجيبية بطفل يُدوِّر جسماً. يكون المسار دائرياً إذا نظرنا إلـــيه مـــن الأعلى. عند مراقبة المسار جانبياً، يبدو الجسم وكأنه يتحرك باتجاه اليسار، ثم تزداد سرعته، ثم تتـــباطأ، ثم تـــنعكس، ثم ينتقل باتجاه اليمين، ثم تزداد السرعة، ثم تتباطأ، ثم تنعكس، ثم ينتقل لليسار مرة أخـــرى، ثم تـــزداد سرعته، ثم تتباطأ، ثم تنعكس. تكون الحركة الفعلية للجسم دائرية وثابتة. افترض أنها حـــدثت بمعـــدل دورة بالثانية. يتحرك الجسم على قوس دائري طوله $180°$ كل نصف ثانية، وعلى قوس دائري طوله $90°$ كل ربع ثانية، وعلى قوس دائري طوله $45°$ كل $1/8$ ثانية، وعلى قوس دائري طوله $1°$ كل $1/360$ ثانية، سيقول العالِم أو المهندس بأن السرعة الزاويّة للجسم $360°/s$.

رسم الموجة الجيبية

افترض أنك ترسم بدقة موضع جسم متأرجح بدلالة الزمن عند النظر إليه جانبياً. يُرسم الزمن أفقياً؛ بحيث يكون الماضي باتجاه اليسار؛ والمستقبل باتجاه اليمين. تظهر الدورة الكاملة للجسم على الرسم كموجة جيبية. يمكن إسناد قيم الدرجات على طول هذه الموجة بشكل يتوافق مع الدرجات حول الدائرة (الشكل (17-1)).

تحدث الحركة الدائرية الثابتة، كحركة جسم مربوط بخيط، في كافة أرجاء الكون. لا يستطيع الطفل الـــذي يُـــدوِّر الجـــسم جعل سرعة الجسم تتباطأ أو تتسارع بحدة أو إيقافها آنياً وتغيير الاتجاه أو تدويره بخطـــوات كالعجلة المسننة. ولكن، حالما تتحرك الكتلة، فإنها لا تأخذ الكثير من الطاقة للاستمرار. الحركة الدائـــرية المنتظمة هي حركة مثالية نظرياً. لا توجد طريقة أفضل من تدوير جسم لتمثيل الحركة الدائرية. المنحنى هو منحنى مثالي أيضاً. لا توجد طريقة أفضل من تدوير الجسم لإنشاء موجة جيبية.



الشكل (17-1): تمثيل رسومي لموجة جيبية كحركة دائرية.

الخصائص الأساسية

تمـــتلك جميع الأمواج، أياً كان نمطها أو وسطها، ثلاث خصائص مختلفة ولكن مترابطة. *طول الموجة* هو المسافة بين نقطتين متطابقتين على موجتين متجاورتين. ويُقاس بالأمتار. *التردد* هو عدد دورات الموجة الـــتي تحـــدث أو تمر من نقطة معينة في وحدة الزمن. يُحدَّد التردد بعدد الدورات بالثانية أو بالهرتز. *سرعة الانتـــشار* هـــي معدل انتقال الاضطراب في الوسط. ويُسجَّل بالأمتار بالثانية. إن هذه الخصائص الثلاث متـــرابطة: *الـــسرعة تساوي طول الموجة مضروباً بالتردد*. يجب استخدام وحدات متوافقة في هذه العلاقة ليكون لها معنى.

الدور، والتردد، وطول الموجة، وسرعة الانتشار

من الأسهل في بعض الأحيان التحدث عن دور الموجة بدلاً من التحدث عن ترددها. إن دور الموجة الجيبية T (بالثواني) هو مقلوب التردد f (بالهرتز). رياضياً، تُعتبر الصيغة التالية صحيحة

$$f = 1/T = T^{-1}$$

$$T = 1/f = f^{-1}$$

إذا كان تردد موجة Hz 1، فإن دورها s 1. إذا كان التردد بالدقيقة ($^1/_{60}$ Hz)، فإن دورها s 60. إذا كان التردد بالساعة ($^1/_{3600}$ Hz)، فإن الدور s 3,600 أو 60 دقيقة.

يرتبط دور الموجة بطول الموجة λ (بالأمتار) وسرعة الانتشار c (بالأمتار بالثانية) على الشكل التالي: *طول الموجة يساوي السرعة مضروبةً بالتردد*. رياضياً

$$\lambda = cT$$

يؤدي ذلك لبروز صيغ أخرى:

$$\lambda = c/f$$

$$c = f\lambda$$

$$c = \lambda/T$$

مسألة (17–1)

إذا قـام الطفل الذي يُدوِّر جسماً مربوطاً بخيط بتخفيض سرعة الدوران بحيث يدور الجسم بمعدل دورة كـل ثانيـتين بـدلاً من دورة بالثانية، ماذا يحدث لطول الموجة الموضح بالرسم في الشكل (17–1)، على افتراض أن الزمن مرسوم أفقياً على المقياس نفسه؟

حل (17–1)

خـذ بالاعتبار الصيغة $\lambda = c/f$. إن تخفيض التردد إلى النصف سيؤدي لمضاعفة طول الموجة. إذا كانت كل تدريجة أفقية تُمثِّل كمية ثابتة من الزمن، وبالتالي إذا دار الجسم بنصف السرعة، يتضاعف طول الموجة.

وحدات التردد

تتكـرر الأمواج الصوتية السمعية بمجالات زمنية أصغر من جزء من الثانية. يبلغ أخفض تردد صوتي يـستطيع الكـائن البشري سماعه حوالى 20 دورة بالثانية أو 20 هرتز (Hz 20). ويبلغ أعلى تردد صوتي للموجة يستطيع الإنسان بآذان حادة سماعه أكبر بألف مرة: أي Hz 20,000.

يختلف الوسـط الذي تنتشر فيه أمواج الراديو عن الوسط الذي تنتشر فيه الأمواج الصوتية. يبلغ أخفـض تـردد لأمواج الراديو بضعة آلاف من الهرتز، وتصل تردداها العليا إلى تريليونات الهرتزات. إن تـرددات الأمـواج تحت الحمراء (IR) وأمواج الضوء المرئي أعلى بكثير من ترددات أمواج الراديو. تصل ترددات الأمواج فوق البنفسجية (UV)، وأشعة x–، وأشعة غاما (γ) إلى كادريليونات وكنتيلونات الهرتز، لتهز بتردد أكبر بتريليون مرة من تردد العلامة الموسيقية C على المدرج الموسيقي.

اسـتخدم العلمـاء والمهندسون وحدات التردد للإشارة للترددات العالية وهي الكيلو هرتز (kHz)، والمـيغا هرتز (MHz)، والجيغا هرتز (GHz)، والتيرا هرتز (THz)، بحيث تساوي كل وحدة ألف ضعف

الوحدة التي تسبقها في هذا التسلسل أي 1 kHz = 1,000 Hz، و1 MHz = 1,000 kHz، و 1 GHz = 1,000 MHz، و1 THz = 1,000 GHz.

المزيد حول السرعة

إن أكبر سرعة تم قياسها هي 299,792 كيلو متراً (186,282 ميلاً) بالثانية في الخلاء. يمكن تقريب ذلك بالتدوير إلى 300,000 km/s أو 3.00×10^8 m/s. إنها *سرعة الضوء* الشهيرة. وهي السرعة العظمى المطلقة التي يستطيع أي جسم التحرك بها. (أشارت بعض التجارب اللاحقة إلى أن تأثيرات معينة تتحرك أسرع من ذلك، وذلك في المسافات الطويلة جداً، فإن السرعة 3.00×10^8 m/s هي السرعة الحدية التي نعرفها). تنتقل الاضطرابات بسرعة أقل من سرعة الضوء، في الفضاء الموجود بين المجرات. حتى الضوء نفسه يتحرك بسرعة أقل بكثير من السرعة الحدية في وسط مختلف عن الخلاء.

تنتشر الأمواج الصوتية في الهواء في مستوى سطح البحر بسرعة 335 m/s. أو حوالى 700 ميل بالساعة (mi/h). يدعى ذلك 1 *ماك*. عندما تتكلم مع شخص ما في الغرفة، ينتقل صوتك بسرعة 1 ماك. ينتشر الصوت في الهواء بسرعة 1 ماك أياً يكن التردد أو قوة الصوت (صوت عال أو منخفض). تتغيّر دقة المنحنى قليلاً، اعتماداً على زاوية الطول الجغرافي، وعلى درجة الحرارة، وعلى الرطوبة النسبية، ولكن يُعتبر 335 m/s عدداً جيداً لنتذكره.

لا تتجاوز سرعة الأمواج الكهرطيسية أبداً السرعة الكونية الحدية المطلقة. تنتشر الأمواج الضوئية في الزجاج أو في الماء بسرعة أقل بكثير من 3.00×10^8 m/s. تتباطأ الأمواج الراديوية عند مرورها في طبقة الأيونسفير الأرضية. تؤثر تغيرات السرعة هذه على طول الموجة حتى لو بقي التردد ثابتاً.

مسألة (17-2)

واحد نانو متر (1 nm) يساوي 10^{-9} m. افترض أن طول موجة حزمة ضوئية في الفضاء الحر يبلغ 500 nm، ثم دخلت هذه الحزمة وسطاً جديداً تبلغ سرعة الضوء فيه 2.00×10^8 m/s فقط. بما أن التردد لا يتغير، ماذا يحدث لطول الموجة؟

حل (17-2)

لاحظ الصيغة السابقة التي تُحدد طول الموجة بدلالة السرعة والتردد:

$$\lambda = c/f$$

انخفضت السرعة إلى 200/300 من قيمتها الابتدائية. لذلك، ينخفض طول الموجة أيضاً إلى 200/300 من قيمته الابتدائية. طول الموجة في الوسط الجديد 500 nm × 200/300 أو 333 nm.

السعة

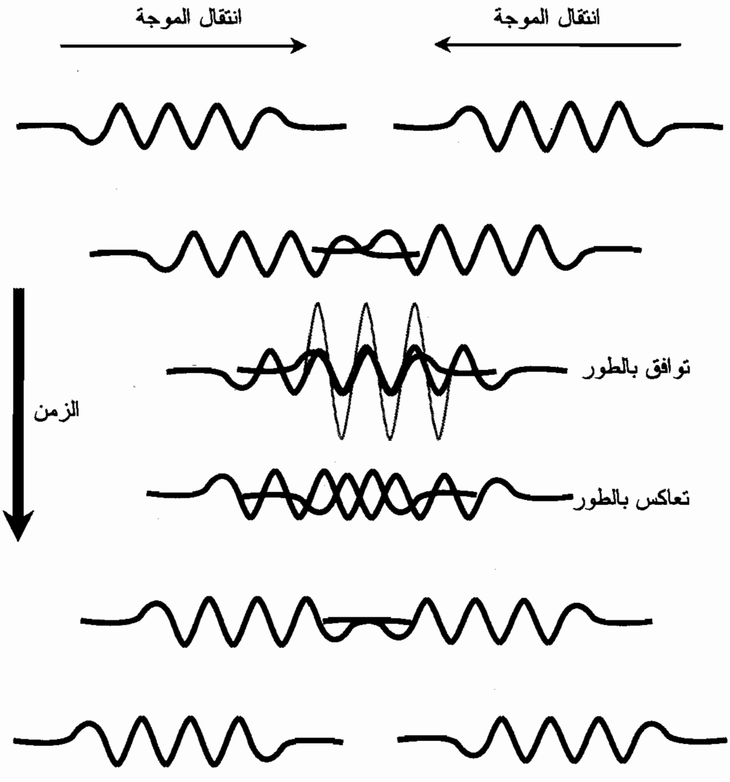
توجد خاصة أخرى للأمواج تُضاف إلى التردد أو الدور، وطول الموجة، وسرعة الانتشار: وهي

الـــسعة. إنها قوة أو ارتفاع الموجة، أو المسافة النسبية بين قيمتين وخلالهما. عندما تكون العوامل الأخرى ثابتة، تكبر السعة بزيادة الطاقة التي تحويها الموجة.

تتناســـب طاقة الموجة الضوئية طرداً مع السعة، وطرداً مع التردد، وعكسياً مع طول الموجة. ينطبق الأمر نفسه على أشعة غاما، وأشعة -x، وUV، وIR، وأمواج الراديو. ولكن، لا تُطبَّق هذه العلاقات الرياضية الدقيقة على الأمواج المنتشرة على سطح سائل. تُعتبر السعة أحياناً، ولكن ليس دائماً، مؤشراً دقيقاً لطاقة الموجة.

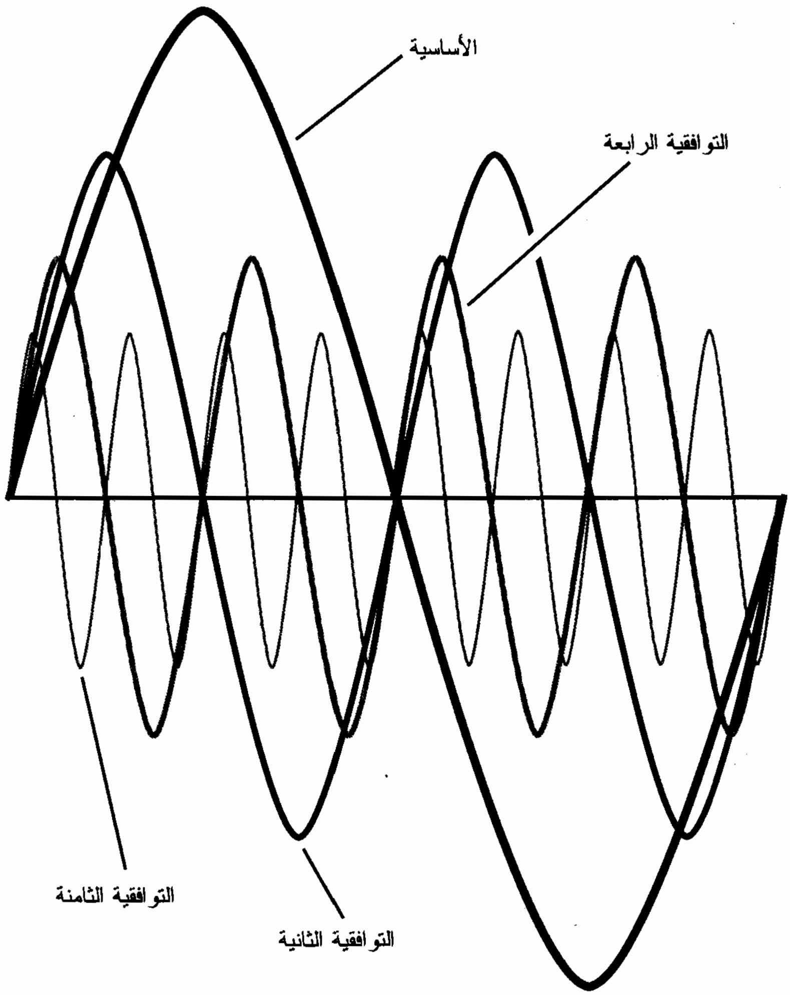
الاهتزازات الدائمة قصيرة الأجل (Seiche) والتوافقيات

يعلـــم أي طفل يعيش في منـــزل فيه حمام عن الاهتزازات الدائمة قصيرة الأجل. يستطيع أي جسم محـــاط بالماء أو نصف محاط بالماء أن يُخضخض جيئةً وذهاباً بمعدل يعتمد على حجم وشكل الإناء. يمكن ضبط هذه الخضخضة بدور يبلغ 1 أو 2 ثانية. أعط الماء دفعة صغيرة، ثم دفعة أخرى، وأخرى. حافظ على ذلـــك بمعدّل متكرر منتظم ومُحدد وستجد على الفور ماءً في الحمام بكامله. يمكن أن يحدث الشيء نفسه في بـــركة السباحة أثناء الزلزال، على الرغم من أن الدور أطول. عندما تتحرك الأمواج باتجاهات متعاكسة فإنها تتصادم، وتتعاظم القمم وما بين القمم (الشكل (17-2)).



الشكل (17-2): عند اصطدام موجتين، تتعاظم التأثيرات.

تـــشبه التوافقيات أي شخص يعزف على آلة موسيقية كالمزمار أو الفلوت أو البوق أو الترمبون. لو اســـتطعت إصـــدار نغمة عبر ضغط مفاتيح معينة أو إزاحة الزالقة لموضع معين، ثم شددت شفتيك بشكل كاف، فإنك تُحدث نغمة أعلى بأوكتاف. النغمة الأعلى هي *التوافقية الثانية* للنغمة الأولى. تحتوي حجرة الآلـــة على ضعفي قمة الموجة وقاعدها بالنسبة للنغمة الأعلى مقارنة بالنغمة الأخفض. لو كنت موسيقاراً، ربمـــا كـــنت ستحصل على آلة مزمار بتردد يبلغ ثلاثة أضعاف التردد الأصلي أو الأساسي. إنها *التوافقية الثالثة*. رياضياً، لا توجد نهاية للتوافقيات (الشكل (17-3)). عندما يكون تردد إحدى الأمواج عبارة عن إحدى توافقيات موجة أخرى، نقول إن الموجتين مترابطتان توافقياً.



الشكل (17-3): تحدث تأثيرات الرنين في أطوال موجية مساوية لأجزاء من العدد الكلي لطول الموجة الأساسية.

الرنين

يمكـــنك البرهان على وجود التوافقيات إذا كان لديك حبل طوله حوالى 10 m. ثبِّت إحدى نهايتي الحـــبل بجسم ثابت كدعامة السياج أو بخطاف في الجدار. تأكد من أن الحبل مربوط بشكل آمن بحيث لا يفلـــت. أمـــسك النهاية الأخرى وتراجع حتى يصبح الحبل مشدوداً. ثم ابدأ بالهز ببطء في البداية ثم أسرع تدريجـــياً. سيصل الحبل عند سرعة اهتزاز معينة إلى إيقاع يبدو فيه أنه يتحرك للأعلى والأسفل لوحده. إنها حالـــة *الرنين*. دعه يستمر بذلك لبرهة، ثم ضاعف معدّل الهز. إذا حافظت على معدل الاهتزاز، ستحصل علـــى دورة كاملة للموجة تظهر على طول الحبل. سينعكس طور الموجة نفسها في كل مرة تقوم فيها بهز الحبل، وستبلغ درجة الانحناء شكلاً مألوفاً: وهو التابع الجيبـــي. حافظ على هز الحبل بهذا المعدل لبرهة. ثم إذا اســـتطعت، ضـــاعف سرعة الاهتزاز مرة أخرى. تتطلب هذه التجربة بعض الشروط والتنسيق، ولكن ستحـــصلُ أخيراً على موجتين بدورتين كاملتين تظهران على طول الحبل. أنت في التوافقية الثانية للاهتزاز السابق، وحدث الرنين مرة أخرى.

إذا كـــنت قـــوياً وسريعاً بشكل كاف، وإذا كنت تملك قوة تحمّل كافية، قد تضاعف التردد مرة أخرى، لتحصل على أربع أمواج كاملة ودائمة تظهر على طول الحبل (التوافقية الرابعة). إذا كنت رياضياً محترفاً، ربما تستطيع مضاعفة ذلك مرة أخرى، للحصول على ثماني أمواج دائمة (التوافقية الثامنة). لا يوجد نظرياً نهاية لعدد الدورات التي يمكن أن تظهر بين نقطة التثبيت ومن يقوم بالهز. بالطبع، في الحياة الحقيقية، فإن لقطر الحبل ومرونته نهاية.

عندما تقوم بهز الحبل، تكون *حركة نبضات الموجة طولية*؛ إنها تنتقل بشكل طولي على طول الحبل. تخـــضع جزيئات الحبل الفردية *لحركة عرضية*؛ إنها تنتقل من جانب إلى آخر (أو من الأعلى إلى الأسفل). تشبه الأمواج الموجودة على طول الحبل التموجات الموجودة على سطح المحيط.

توقف عن هز الحبل ودعه يستقر. ثم قدم له هزة واحدة قوية وسريعة. تنطلق موجة وحيدة من يدك باتجاه النهاية البعيدة ثم تنعكس من النهاية المُثبّتة وتعود باتجاهك. بانتقال النبضة، تتهاوى السعة. ثبت يدك عـــند عودة الموجة سيجري امتصاص طاقة النبضة جزئياً بواسطة ذراعك وسينعكس جزء عن يدك متجهاً باتجـــاه النهاية البعيدة مرة أخرى. تتلاشى الموجة بعد عدة انعكاسات. تم تبديد بعض طاقتها في الحبل. تم تـــبديد بعـــض الطاقة في الجسم الذي تم فيه تثبيت النهاية البعيدة للحبل. جرى امتصاص بعضها بواسطة جسمك. حتى الهواء استهلك قليلاً من طاقة الموجة الأصلية.

الأمواج الدائمة

ابـــدأ بهـــز الحبل وفق إيقاع مُعيّن مرة ثانية. قم بضبط الأمواج على طول الحبل كما فعلت سابقاً. أرسل أمواجاً جيبية باتجاه الأسفل. تنعكس النبضات عند ترددات اهتزاز معينة، جيئةً وذهاباً عن يدك وعن نقطـــة التثبيت بحيث تُضاف تأثيراتها لبعضها. تتعرض كل نقطة من الحبل إلى قوة تتجه للأعلى، ثم إلى قوة تـــتجه للأســـفل، ثم إلى قوة تتجه للأعلى ثانية، ثم إلى قوة تتجه للأسفل ثانية. تتعزز النبضات المنعكسة؛ وتتعاظم الحركة الجانبية للحبل. وتظهر *الأمواج الدائمة*.

أتـــى اسم الأمواج الدائمة من حقيقة أنها لا تنتقل إلى أي مكان بنفسها. ولكن تستطيع أن تكتسب قـــدرة هائلة. تتحرك بعض النقاط على طول الحبل إلى الأعلى والأسفل كثيراً، وبعضها يتحرك إلى الأعلى والأســـفل قلـــيلاً، وبعض النقاط تبقى ثابتة دائماً، لتدور بشكل طفيف بينما تهتز بقية الحبل. تُدعى نقاط الحـــبل الـــتي تتحرك إلى أقصى الأعلى والأسفل *بالأنشوطات*؛ وتدعى نقاط الحبل التي لا تتحرك *بالعقد*. يوجد دائماً أنشوطتان وعقدتان في دورة الموجة الدائمة. تبعد جميعها مسافات ثابتة عن بعضها البعض.

مسألة (3-17)

كم تبعد أنشوطة الموجة الدائمة عن العقدة المجاورة لها بدلالة درجات الطور؟

حل (3-17)

يجب أن تتذكر من الفصل الثالث عشر، أنه يوجد 360^o في الطور في الدورة الواحدة. من الشرح الـــسابق، توجد أنشوطتان وعقدتان في الدورة الكاملة، تبعد عن بعضها مسافات متساوية؛ ذلك يعـــني أنهـــا تـــبعد عن بعضها ربع دورة أو 90^o. أي تبعد أي أنشوطة 90^o عن العقدة في أي من الجانبين؛ وتبعد أي عقدة 90^o عن أي أنشوطة في أي من الجانبين.

الأمواج غير المنتظمة

ليست جميع الأمواج جيبية. إن بعض الأمواج غير الجيبية بسيطة، ولكن لا تُرى في الطبيعة إلا نادراً. تتحرك بعض هذه الأمواج بشكل مفاجئ أو غير متوقع؛ فهي تقفز أو تهتزّ جيئةً وذهاباً بشكل مختلف عن الـــتابع الجيبـــي الانسيابي. لو استخدمت راسم اهتزاز مخبري، لكنت اعتدت على أمواج كهذه. إن أبسط الأمـــواج غير الجيبية هي *الموجة المربعة، والموجة الخطية، وموجة سن المنشار، والموجة المثلثية*. لقد تعلمت ذلـــك في الفصل الثالث عشر. يمكن توليد هذه الأمواج بواسطة مُحلّل موسيقي إلكتروني، بحيث يكون لها كمـــال رياضـــي معين، ولكن لن تراها أبداً في البحر. تظهر الأمواج غير المنتظمة بأشكال لا تعد وتحصى كبـــصمات الأصابع أو ندف الثلج. البحر مليء بهذه الأمواج. في عالم الأمواج، البساطة قليلة، والفوضى هي الشائعة.

تُنـــتج معظـــم الآلات الموسيقية أمواجاً غير منتظمة، كالتقطيعات الموجودة على سطح البحيرة. إنها تراكيب معقدة للأمواج الجيبية. يمكن تفكيك أي شكل موجي إلى مُكوِّنات جيبية، على الرغم من احتمال تعقـــيد الرياضـــيات المُسخّرة لذلك. تتراكب الدورات مع بعضها بدورات أطول، والتي تتراكب بدورها بـــدورات أكثـــر طـــولاً، وبشكل *لا نهائي*. حتى الأمواج المربعة، والأمواج الخطية، وأمواج سن المنشار، والأمواج المثلثية، بحوافها المستقيمة وزواياها الحادة، مُركّبة من أمواج جيبية انسيابية موجودة بنسب دقيقة. إن الأمـــواج من هذا النمط أسهل سماعاً في الأذن مقارنة بالأمواج الجيبية. وهي أسهل توليداً. جرب ضبط مُحلّـــل موســـيقي أو مُولّد إشارة لإنتاج أمواج مربعة وأمواج خطية، وأمواج سن منشار، وأمواج مثلثية، وأمـــواج غـــير منـــتظمة، واستمع إلى الفرق عند سماعها. لجميعها الطبقة الموسيقية نفسها، ولكن الجرس الموسيقي أو اللحن مختلف.

تفاعل الأمواج

يمكـــن أن تتحد موجتان أو أكثر لإنتاج موجة ذات تأثيرات هامة، وفي بعض الحالات، لإنتاج نماذج غير عادية. يمكن أن تتضخم السعات، ويمكن أن تتغيّر الأشكال الموجية، ويمكن توليد أمواج جديدة كلياً. تتضمن الظواهر العامة لتفاعل الأمواج *التداخل، والانحراف، والهيترودين.*

التداخل

تخـيل أنـــك متزلج على الماء. إنك تقضي الشتاء على الشاطىء الشمالي لأهايو. تظهر في الدوائر القطبية الـــشمالية الجزئية، عواصف عبر المحيط الهادئ، تدور دوراتها الأصلية بالقرب من شبه جزيرة كامشاتكا. شاهدت صور القمر الصناعي لهذه العواصف على الإنترنت. إن عاصفة كامشاتكا الأدنى قوية ودائمة وتسبب نظماً تبتلع الجنوب الشرقي وتُصرِّف ضراوتها في أميركا الشمالية. تندفع تموجات هذه العواصف عبر المحيط الهادئ بكامله؛ لا يوجد ما يفصل بين مسارات العاصفة وشواطئ هاواي. تصل التموجات إلى أماكن مثل بايبلاين مُحطمة المرجان والرمل، لتبلغ ارتفاعات تتجاوز عادةً 5 m (16 ft). تهب الرياح التجارية من الشرق إلى الغرب، منتجة تموجات أصغر في الجانب الآخر للتموجات الكبيرة. تُضيف العواصف والرياح المحلية المصحوبة بالثلوج عادةً أمواج قصيرة متلاطمة. في اليوم الجيد- أي اليوم الذي تنتظره كمتزلج على الماء - تكون تموجات العاصفة قوية، والريح خفيفة. يمكـــنك ركوب الأمواج الكبيرة دون أن تصطدم بالأمواج الصغيرة. تتكوم الأمواج في اليوم السيئ كيفما اتفق. تكون الموجة الرئيسية كبيرة ومحددة جيداً كما في اليوم الجيد، ولكن التداخل يجعل التزلج صعباً.

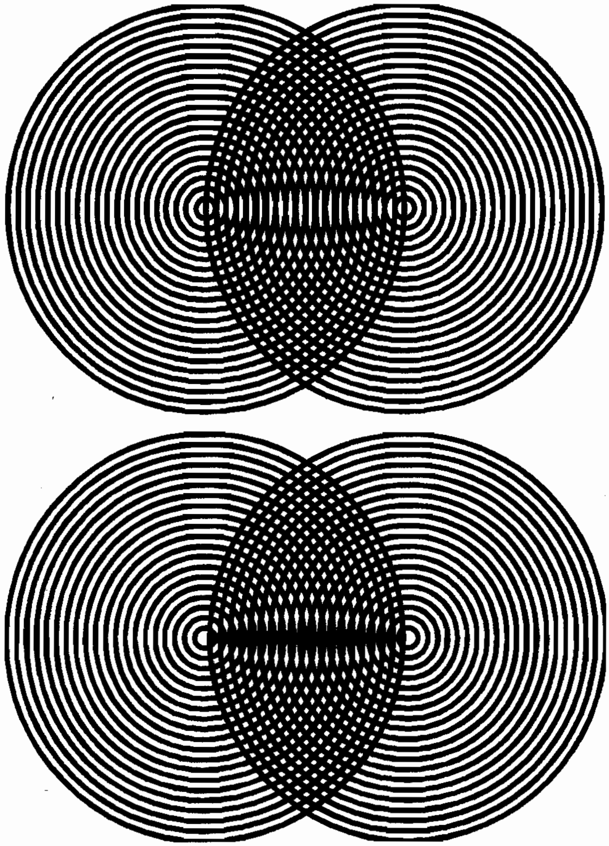
عـــندما تبعد موجتان بحريتان رئيسيتان عن بعضهما مسافة كبيرة، تُنتج كل منهما تموجات كبيرة، وتصبح الأشياء ممتعة. من الأكثر احتمالاً أن تجذب شروط كهذه العلماء بدلاً من المتزلجين. يمكن أن يحدث هـــذا الـــنمط أثناء الشتاء في الشاطئ الشمالي لأهايو ولكنه موجود غالباً في المناطق الاستوائية أثناء فصل الإعصار. تُنتج العواصف الاستوائية أكبر أمواج متكسرة في العالم. عندما يطوف الإعصار في البحر، تنبعث الـــتموجات كدوائر تتسع انطلاقاً من الدوامة المركزية للعاصفة. إذا حدثت عاصفتان متشابهتان في الحجم والـــشدة ومفـــصولتان بمـــساحة هائلـــة، تمتد أثناء العواصف نماذج لتموجات معقدة لمسافة تبلغ ملايين الكيلومترات المربعة. بين العواصف، تتعزّز التموجات وتلغي بعضها بشكل متناوب، لتنتج بحاراً متوحشة.

تظهر *النماذج المتداخلة* الناشئة عن مُزوِّدات الأمواج بكافة المقاييس، من تموجات البحر إلى الأمواج الـــصوتية في قاعـــة الحفلات الموسيقية، ومن أبراج البث الراديوية إلى أجهزة الهولو غرافيك. يمكن للتغير الـــصغير جـــداً في المواضـــع النسبية أو الأطوال الموجية لمزوِّدين إنشاء تغيّر كبير في طريقة نشوء النموذج المُركّب. الأمثلة موضحة في الأشكال (17-4) و(17-5).

افتـــرض أن عاصـــفتين اســـتوائيتين تندفعان في حوض الأطلسي، موجهتين بتيارات هوائية في أعلى الغـــلاف الجـــوي. يتطور نموذج التداخل الناتج عن تموجاتهما من لحظة إلى أخرى. تتعاون أعالي الأمواج وأخفـــضها علـــى طول مسار يبلغ مئات الكيلومترات: لتشكل *الموجة المؤذية*. يمكن لموجة الشبح هذه أن تقلـــب البواخر وسفن الشحن. يقص البحارة العريقون قصصاً عن جدران من الماء تقتحم البحر المفتوح، وتبدو وكأنها تتحدى قوانين الهيدروديناميك.

(أ)

(ب)

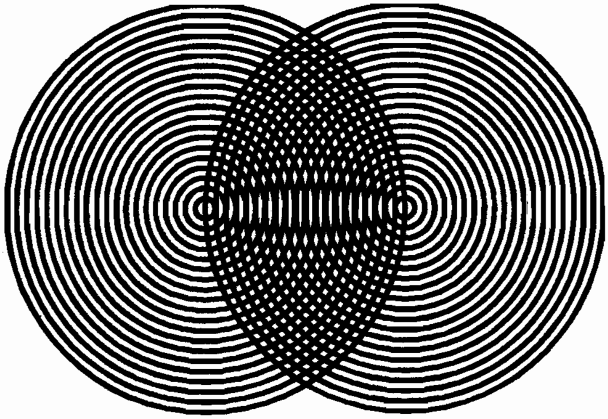


الشكل (17–4): يمكن أن تغيّر إزاحة طفيفة للمُزوِّد نموذج التداخل بشكل كبير.
لاحظ الفرق بين النموذج المُشكّل بواسطة الخطوط المتقاطعة في القسم أ،
مقارنة بالنموذج في القسم ب.

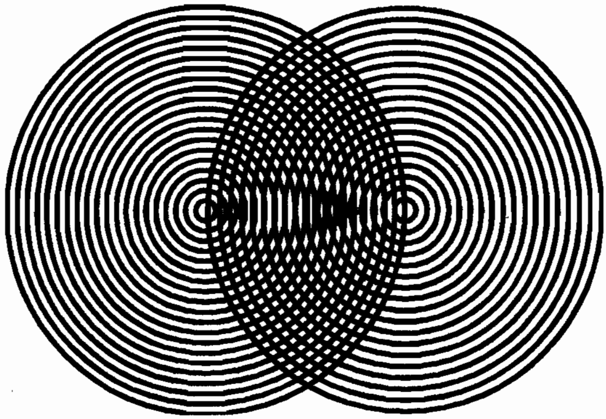
ليس من السهل أبداً بالنسبة للعلماء مراقبة تداخل الأمواج في أعالي البحار، نتيجة الرعب من إمكانية انسجامها. يمكن رؤية هذه النماذج في بعض الأحيان من الطائرات، ويمكن للرادارات المعقدة أن تُظهر دقائق السطح، ولكن لا تُعير المحيطات نفسها للتجارب المُتحكَّم بها. ولا تستطيع أنت الخروج في قارب وتبحر وتراقب النماذج التي تتداخل فيها تموجات العاصفة لتتوقع العودة ببيانات ذات معنى، مع أنك قد تعود بقصص تقصها على أحفادك إذا نجوت. ولكن، توجد طرق يستطيع حتى الطفل بواسطتها إجراء تجارب بارزة لتقارب وتداخل الأمواج.

إن فقاعات الصابون، بسطوحها الملونة بألوان قوس قزح، مُكيّفة لذلك. تُضاف أمواج الضوء المرئي لبعضها وتلغي بعضها في الطيف المرئي، لتنعكس عن السطوح الداخلية والخارجية لغشاء فقاعة الصابون لتداعب العين بالأحمر، والأخضر، والبنفسجي، والأحمر ثانية.

(أ)



(ب)



الشكل (17-5): تطابق طول الموجة (أ) مقابل 10 بالمائة فرق (ب).
لاحظ الفرق في نموذج التداخل الناتج عن تغيّر طول الموجة.

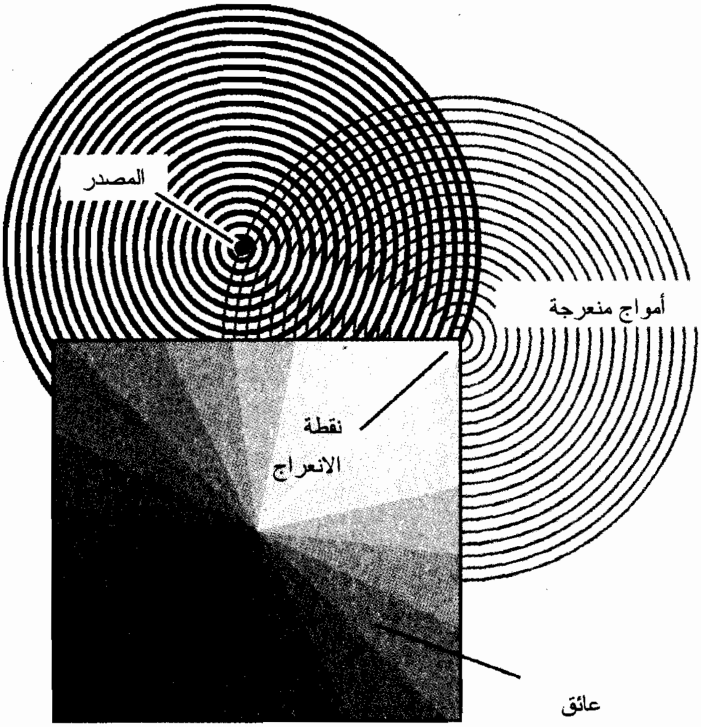
يستطيع اليافعون اللعب بتداخل الأمواج أيضاً. يوفر أي بناء بقبة كبيرة مكاناً مثالياً لتداخل الأمواج. وفقاً للأسطورة، قديماً وفي قاعات الكونغرس، كان بعض المسؤولين المُنتخَبين قادرين على استراق السمع لهمسات معينة يُفترض أنها خاصة بسبب القبة الكبيرة في الأعلى التي تعكس وتُركّز الأمواج الصوتية الصادرة من فم السياسي إلى آذان سياسي آخر.

الانعراج

تستطيع الأمواج أن تتحزب، وأن تقاتل بعضها، وأن تنتقل في اتجاهات لا منطقية بسرعات تتجاوز الحد المعقول. تستطيع الأمواج أيضاً أن تدوِّر الزوايا. هل تتذكر اللعب في الساحة الجانبية عندما كنت طفلاً، عندما كنت تتمنى أن لا تسمع أمك وهي تناديك من الباب الأمامي؟ عندما يحين الوقت، يصل الصوت إلى أذنيك كيفما اتفق. كيف استطاع الصوت إيجاد طريقه حول المنزل؟ أمك خارج مرمى

نظرك، وأنت خارج مرمى نظرها. لماذا يستطيع الصوت الانتقال إلى أماكن لا يستطيع الضوء الانتقال إليها؟ ألا ينتقل الصوت بخطوط مستقيمة كالضوء؟ هل انعكس صوت أمك عن المنازل الأخرى في الجوار؟ لاكتشاف ذلك، قمت بتجربة مع صديقة لك بالقرب من مخزن حبوب مهجور في وسط مكان ما، ووجد صوتها طريقه حول البناء على الرغم من عدم وجود شيء بالجوار يمكن أن ينعكس الصوت عنه.

يدور الصوت الزوايا، وخاصة الزوايا الحادة، لأن للأمواج القدرة على *الانعراج*. عندما يُصادف اضطراب الموجة عائقاً "حاداً"، يتصرف العائق كمُزوِّد جديد للقدرة بطول الموجة نفسه (الشكل (17-6)). يمكن أن تحدث الظاهرة بشكل متكرر. حتى لو اختبأت في كراج، ستستمر بسماع الصوت. يوجد ثلاثة منازل في نهاية الشارع، تستطيع سماع الصوت. لاحظت إمكانية انعراج الأصوات الصادرة عن الآلات الموسيقية، والصادرة عن محركات السيارات، وآلات جزّ الأعشاب، وجميع أنواع مُولِّدات الضجيج. كما يعلم أي شخص يسكن المدينة أنه لا يستطيع أي كان الاختباء من الضجيج. الانعراج هو أحد أسباب انتشار الصوت في كل مكان.



الشكل (17-6): يُتيح الانعراج "دوران الأمواج حول الزوايا".

تنعرج الأمواج الطويلة بسهولة أكبر من انعراج الأمواج القصيرة. عندما تصبح الحافة أو الزاوية حادة بالنسبة لطول موجة الصوت، يحدث الانعراج بشكل أكثر كفاءة. يزداد طول الموجة بانخفاض التردد، وبالتالي تصبح جميع الحواف والزوايا، في الحقيقة، أكثر حدة. ليس هذا التأثير مقتصراً على الأمواج

الصوتية. إنه يحدث مع أمواج الماء كما يعلم أي متزلج على الماء. يحدث الانعراج في أمواج الراديو؛ وهذا هو سبب سماعك لمحطات البث في راديو السيارة الخاص بك، وخاصة في مجال بث AM، حيث يبلغ طول الأمواج الكهرطيسية مئات الأمتار، حتى لو وُجدت أبنية أو تلال بينك وبين جهاز الإرسال. تنعرج أمواج الضوء المرئي أيضاً، على الرغم من دقة التأثير وإمكانية ملاحظته في شروط معينة فقط. تنعرج جميع الأمواج حول الزوايا الحادة. إن إحدى التجارب التي يتحقق بواسطتها العلماء من طبيعة موجة الاضطراب هي برؤية إمكانية أو عدم إمكانية ملاحظة أو عدم ملاحظة دورانها حول الزوايا.

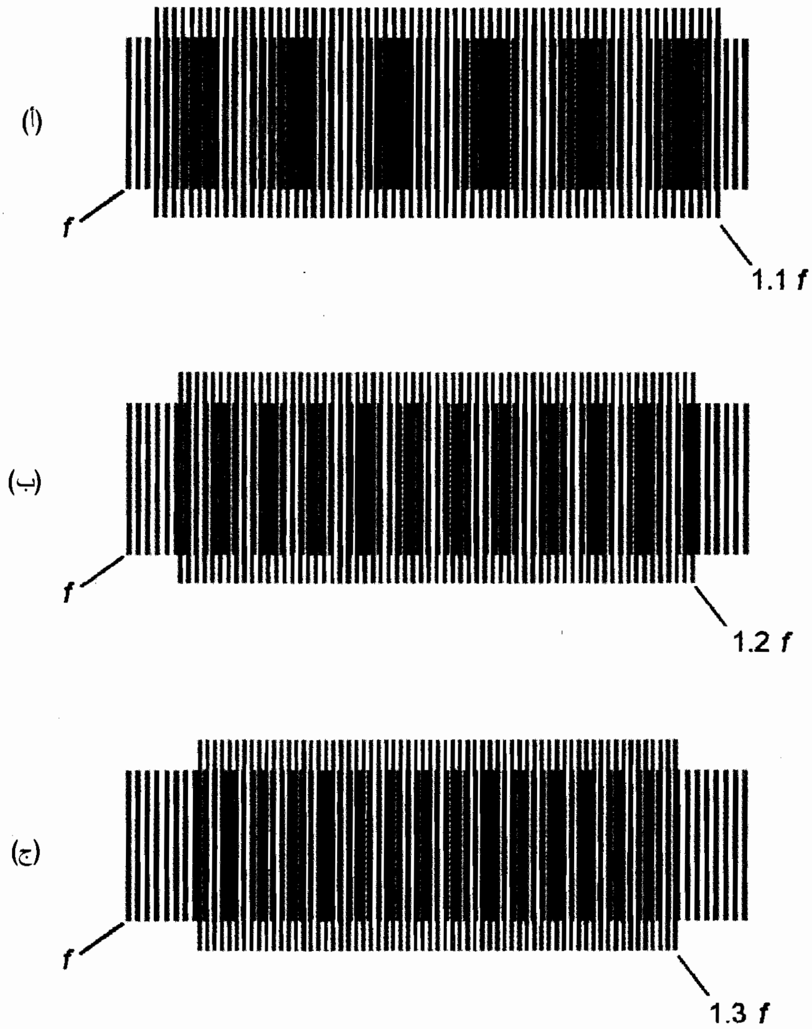
عندما يكون العائق صغيراً جداً مقارنة مع طول موجة الاضطراب، تنعرج الأمواج بشكل جيد وتمر عبر الجسم وكأنه غير موجود. ليس لسارية العلم تأثير على الأمواج الصوتية منخفضة التردد. يتجاهل متزلجو المحيط دعائم الرصيف.

الهيترودين

تمتزج الأمواج أياً يكن نوعها، وبغض النظر عن الوسط الذي تنتشر فيه لإنتاج أمواج أخرى. عندما يحدث ذلك مع الصوت، يدعى ذلك التأثير *بالخفقان*؛ وعندما يحدث ذلك مع أمواج الراديو، يدعى ذلك *بالهيترودين أو المزج*. ستُخفق موجتان صوتيان متقاربتان في طبقة الصوت من بعضهما البعض لتشكيل موجة جديدة بتردد أخفض بكثير من تردديهما، وموجة أخرى بتردد أعلى من تردديهما. يمكنك القيام بتجربة للتحقق من ذلك إذا كنت قادراً على الوصول إلى المُحلّل الموسيقي أو الوصول إلى مُولِّد إشارة مخبري (أو إذا لم يتوفر ذلك، الوصول إلى زوج من الأبواق ذات الصوت الصافي). عند عزف نغمتين على مفتاح الصوت العالي في الوقت نفسه، ستسمع همهمة منخفضة التردد. إنها الطبقة الأخفض لنغمتي الخفقان. تصعب ملاحظة النغمة ذات الطبقة الأعلى. يوضح الشكل (17-7) أمثلة لخفقان الأمواج التي تبدو النغمات منخفضة التردد واضحة فيها. يوضح القسم أ، الأمواج بمجموعات من الخطوط العامودية، المختلفة التردد بمقدار 10 بالمائة (f و$f1.1$) في القسم أ؛ يكون الاختلاف بالتردد بمقدار 20 بالمائة (f و$f1.2$) في القسم ب، ويكون الاختلاف بالتردد في القسم ج بمقدار 30 بالمائة (f و$f1.3$).

تكون ترددات أمواج الخفقان والهيتردوين دائماً مساويةً إلى مجموع وفرق ترددات الأمواج المُنتجة لها. لو عزفت نغمتين مع بعضهما، إحداهما بتردد 1,000 Hz، والأخرى ترددها 1,100 Hz، تظهر نغمة الخفقان بتردد 100 Hz. عند اتحاد نغمتين تردداهما 1,000 Hz و1,200 Hz، يكون تردد موجة الخفقان الناتجة 200 Hz. لو عيّرت مُحلّل الصوت على نغمتين مختلفتين تردداهما 1,000 Hz و1,300 Hz، ستحصل على نغمة خفقان 300 Hz. لو ثبتّ تردد النغمة، وغيرت باطراد تردد الموجة الأخرى، ستزداد طبقة نغمة الخفقان وتنخفض. قم بالتجربة إذا استطعت استخدام مُحلّل الصوت بشكل آمن. ستبدو أمواج الخفقان وكأنها آتية من اتجاه لا يمكن تحديده. إنه إحساس غريب، لا يجب فقدانه بواسطة audiophile مُكرَّس.

اكتُشف هيترودين التردد - الراديوي من قِبل المهندسين في بداية القرن العشرين. تتحد إشاراتان لاسلكيتان، تحت شروط معينة، لإنتاج إشارة جديدة ترددها مساوٍ لفرق الترددين. من السهل تصميم دارة لإحداث هذا التأثير. في الحقيقة، ليست الظاهرة مرغوبة دائماً، ويصعب تجنبها.



الشكل (17–7): يمكن خفق موجتين لتشكيل موجة جديدة ترددها مساوٍ للفرق بين الترددين. (أ) الموجتان تختلفان بالتردد بمقدار 10 بالمائة. (ب) 20 بالمائة. (ج) 30 بالمائة.

لـــيكن لدينا موجتان ترددالهما مختلفة f و g (بالهرتز)، حيث إنّ $g > f$ ، يجري مزجهما مع بعضهما لإنتاج أمواج جديدة ترددالها x و y (بالهرتز أيضاً) على الشكل

$$x = g - f$$

$$y = g + f$$

تُطبَّق هذه الصيغ أيضاً على الترددات المقدرة بالكيلو هرتز، والميغا هرتز، والجيغا هرتز، والتيرا هرتز، أي الالتزام بالطبع بالوحدات نفسها عند إجراء الحسابات.

مسألة (17-4)

افترض أن لديك موجتين، يبلغ تردد إحداهما 500 Hz، ويبلغ تردد الأخرى 2.500 kHz. ما هي ترددات الخفقان؟

حل (17-4)

حـــوِّل الترددات إلى هرتز. بالتالي يكون $f = 500$ Hz و$g = 2,500$ Hz. ينتج عن ذلك ترددات خفقان x وy على الشكل التالي:

$$x = g - f = 2,500 - 500 = 2,000\ Hz$$

$$y = g + f = 2,500 + 500 = 3,000\ Hz$$

لـــو رغـــبت في الحصول على شيء خاص بشأن الأرقام الهامة هنا، يمكنك اعتبار الترددات 2.00 kHz و3.00 kHz، على التوالي.

أسرار الأمواج

كلما تعمقنا في أسرار ظواهر الأمواج، كلما بدت معرفتنا بها قليلة. تُلزم دراسة الأمواج بإنتاج المزيد من الأسئلة والأجوبة.

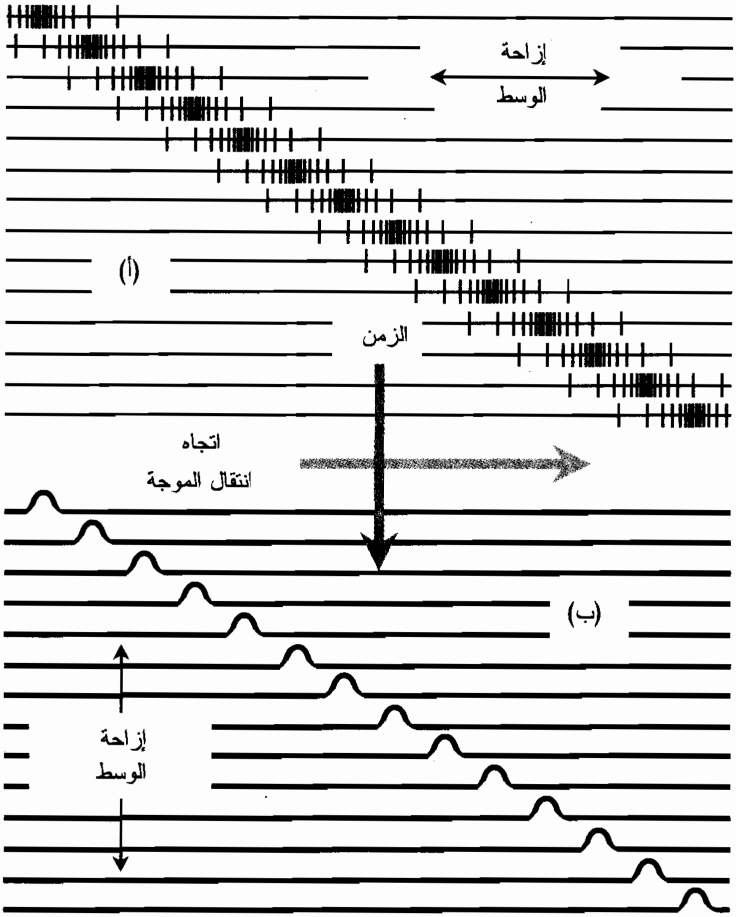
الانتشار الطولي مقابل الانتشار العرضي

عـــندما تنـــتقل الأمواج في المادة، تهتز الجزيئات من وإلى، أعلى وأسفل، جيئةً وذهاباً. تختلف طبيعة حـــركة الجُسيْم عن طبيعة حركة الموجة. نادراً ما تنتقل الذرات أو الجزيئات لمسافة أكبر من بضعة أمتار – وتكـــون مـــسافة الانتقال في بعض الأحيان أقل من سنتمتر– ولكن يمكن للموجة أن تنتقل لمسافات تبلغ آلاف الكيلومترات. تهتز الجُسيْمات في بعض الأحيان بشكل خطي باتجاه انتقال الموجة؛ إنها موجة *الضغط*، وتدعى أيضاً *بالموجة الطولية*، تتحرك الجُسيْمات في حالات أخرى بزوايا عامودية على اتجاه الانتشار؛ إنها *الموجة العرضية*. يوضح الشكل (17-8) الفرق بينهما.

ماذا يهز ذلك أو ما الذي يهتز أو ينضغط أو يتمدد عندما تنتقل الموجة في وسط خاص؟ يعتمد ذلك علـــى الوســـط وعلى طبيعة اضطراب الموجة. تكون الأمواج الصوتية في الهواء طولية، ولكن تكون أمواج الـــراديو على سطح المحيط عرضية، ولكن عندما تصل الموجة إلى الشاطئ، يكون قد انخرط فيها الكثير من الأمواج ذات الحركة الطولية.

حقول القوة

عندما تنتقل الأمواج في الخلاء، تظهر كحقول قوة (في حالة الأمواج الكهرطيسية) أو كتموجات في فـــضاء – زمن (في حالة أمواج الجاذبية). استغرق العلماء وقتاً طويلاً لقبول حقيقة إمكانية انتشار الأمواج دون وجود أي وسط ظاهري يحملها.



الشكل (17-8): في الموجة الطولية (أ)، تهتز الجُسيْمات بشكل موازٍ لاتجاه انتقال الموجة. في الموجة العرضية (ب)، تهتز الجُسيْمات بشكل عامودي على اتجاه الانتشار.

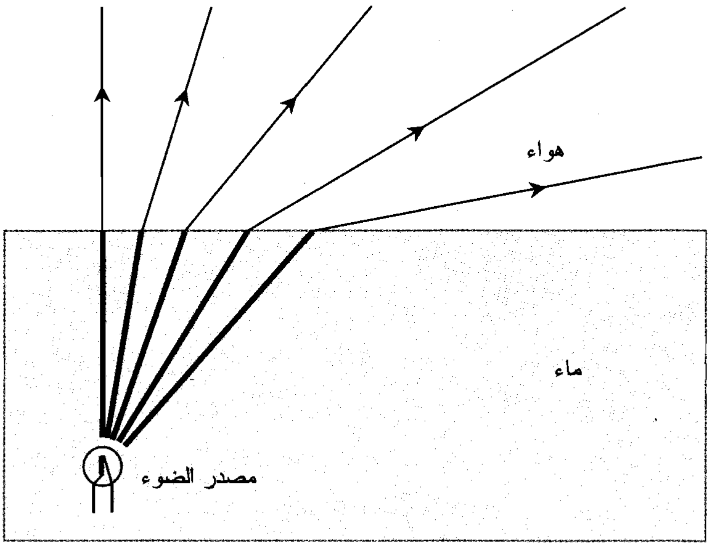
إن كـلاً من أمواج الجاذبية والأمواج الكهرطيسية هي عبارة عن اضطرابات عرضية. تنتشر حقول القوة المغنطيسية والكهربائية في أمواج الراديو، أو IR، أو الضوء المرئي، أو UV، أو أشعة x أو أشعة غاما بشكل عامودي على بعضها البعض وبشكل عامودي على اتجاه الانتشار. يحدث ذلك في الأبعاد الثلاثة، وبالتالي يمكن رؤيتها "بالعين المجردة". الأمواج الجاذبة أكثر سرية؛ إنها تسبب اهتزاز فضاء - زمن بأربعة أبعاد. إذا طلب منك أي شخص رؤية موجة مهتزة بأربعة أبعاد مباشرة، فذلك إما مزاح أو جنون. ومع ذلك يمكن تحديدها بسهولة تامة باستخدام الرياضيات.

انكسار الضوء

إن نظرية انتشار الموجة الكهرطيسية هي إضافة حديثة نسبياً إلى مكتبة المعرفة الفيزيائية. اعتقد اسحق

نيوتن وهو رياضي وفيزيائي القرن السابع عشر والمشهور بنظريته في الجاذبية ودوره في ابتكار الحساب، أن الضوء المرئي يتكون من جُسيْمات جزئية بالغة الدقة (مايكروسكوبية). ينتقل الضوء بالنسبة لمراقب عادي، في خطـوط مـستقيمة في الهواء وفي الفضاء الحر. تُلقى الظلال بطريقة تقترح أنه لا يوجد استثناءات لهذه القاعدة على الأقل في الخلاء. يعلم العلماء اليوم بأن الضوء يتصرف كوابل من الرصاص في بعض الحالات. تمتلك جُسيْمات الطاقة الكهرطيسية، والتي تُدعى *بالفوتونات*، كمية حركة وتُطبِّق ضغطاً قابلاً للقياس على الأجسام التي ترتطم بها. يمكن تقسيم طاقة الحزمة الضوئية إلى رُزم (باكيتات) ذات حجم صغير معين بحيث لا يوجد أصغر منه.

ولكــن لا يحــتاج الشخص للبحث بعناء لإيجاد التعقيدات في *نظرية نيوتن في انكسار الضوء*. تقوم الفوتونات بأشياء لا يمكن تفسيرها على السطح الفاصل بين الهواء والماء. اسأل أي طفل يغرز صنارة لصيد السمك في البحيرة، أو اسأل من نظر إلى النهاية العميقة لبركة السباحة ورأى أن 4 m تبدو مثل 1 m. تغيّر الفوتــونات اتجاهها فجأة عندما تمر بزاوية حادة من الماء إلى الهواء أو العكس بالعكس (الشكل (17-9))، ولكن لا توجد قوة ظاهرة تعطيها دفعة عرضية. عند مرور الضوء في موشور زجاجي، تزداد غرابة الأمور؛ لا تنحني حزم الضوء فقط في الزجاج، بل تنحني إلى مدى يعتمد انحناؤها فيه على اللون!



الشكل (17-9): إذا كانت أشعة الضوء تتكون من جُسيْمات، ما الذي يدفعها بشكل جانبي على سطح الماء؟

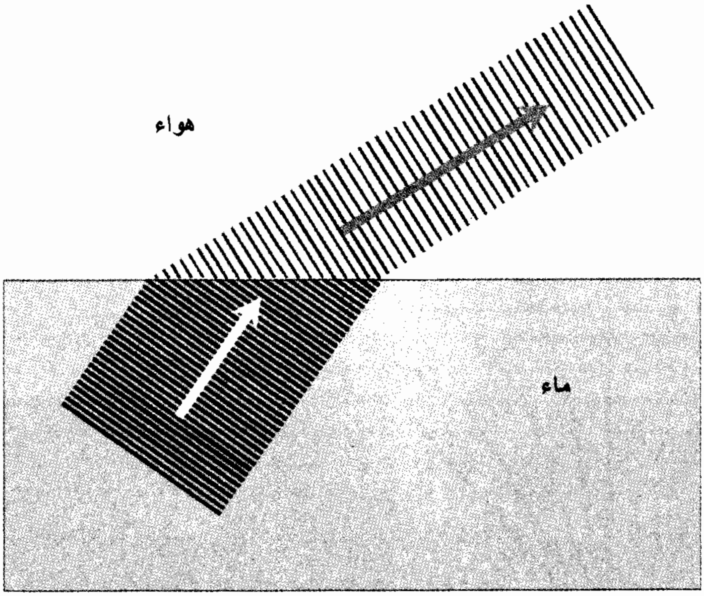
بدائل نظرية الانكسار

فكــر بعض زملاء نيوتن بأنه رسم صورة مبسطة كلياً لطبيعة الضوء، لذلك باشروا رحلتهم لإيجاد الــنماذج البديلة. كان كريستيان هويغنــز وهو فيزيائي ألماني مولع بالبصريات، أول من اقترح بأن الضوء

هــو مــوجة اضطراب، كتموجات البحيرة أو كاهتزازات وتر الكمان. اليوم، يتكلم حتى عامة الناس عن أمواج الضوء وكأنها كلمة واحدة. ولكن لم يكن الارتباط واضحاً بالنسبة للعلماء في القرن السابع عشر.

تابع هويغنــز بحثه وأظهر تداخل أمواج الضوء مع بعضها بالطريقة نفسها التي تتداخل بها أمواج الماء وبالطــريقة نفسها التي تتداخل بها الأمواج الصادرة عن الآلات الموسيقية. يُفسر ذلك ظهور التموجات أو الحلقات المتحدة المركز التي نراها حول الصور في الآلات الضوئية القوية جداً.

يتــرافق انحــناء أشعة الضوء على سطح البحيرة أو البركة بنظرية الموجة. عندما ترتطم حزمة الضوء بالــسطح، تنحني الحزمة بزاوية معينة (الشكل (17–10)). يعتمد مدى الانحناء على الزاوية التي ترتطم بها مقدمة الموجة بالسطح. لا تنحني مقدمة الموجات الموازية للحد الفاصل بين الماء والهواء. إنّ مقدمة الموجات التي ترد لسطح الماء بزوايا كبيرة كفاية لا تعبر سطح الحد الفاصل بل تنعكس عنه.



الشكل (17–10): تغيّر الأمواج الضوئية سرعتها وطول موجتها عند ارتطامها بالحد الفاصل بين أوساط قرائن انكسارها مختلفة.

ما الذي يقوم بالتموج

كـــان لزملاء هويغنــز مشكلة في قبول نظرية الموجة الخاصة به، حتى عندما رأوا الإثباتات بأعينهم. كان عليهم طرح بعض الأسئلة المزعجة. ماذا "يفعل التموج" في اضطراب موجة الضوء؟ عند مرور الضوء في الغلاف الجوي، هل يهتز الهواء؟ وإذا كان كذلك، لماذا لا نسمعه؟ إذا لم يكن يهتز، فلمَ لا يهتز؟ عندما تدخل أمواج الضوء الماء، هل يتموّج الماء؟ وإذا كان كذلك، لم لا يصنع تموجات على السطح؟ وإذا كان الماء لا يتموج، فلم لا يتموج؟ ماذا عن مرور الضوء في حجرة خالية من الهواء؟ إذا كان الضوء المرئي ناتجاً

عـــن اهتزازات فيزيائية، لماذا تظهر الجرة الزجاجية عند ضخ كل الهواء منها شفافةً بدلاً من ظهورها معتمة (غير شفافة)؟ في النهاية، لا يوجد أي شيء في الجرة "يقوم بالتموج"- هل يوجد؟

جرت محاولة في القرن التاسع عشر للإجابة عن السؤال عبر وجود *الأثير*، وهو وسط جرى تخيل أنه يملأ الفضاء بكامله.

في بـــدايات القرن العشرين، قرر مُنظِّر أوروبي ذو تفكير حر يدعى ألبرت أينشتاين بأنه ليس لنظرية الأثير معنى. ستتعلم عن نتائج رفض أينشتاين لنظرية الأثير في الفصل العشرين.

مـــا الـــذي "يقوم بالتموج" في الاضطراب الكهرطيسي؟ لا يزال هذا السؤال يُحيِّر العلماء. تكون الحقـــول الكهربائية والمغنطيسية متعامدة على بعضها، وتهتز بفعل معدلات عالية جداً من التأثير الناتج عن فعلـــها المُركَّب لتنتشر في جميع أنواع الأوساط. تكون الشدة للحقول "أي شدة من يقوم بالتموج"، ولكن هذه الحقول ليست أشياء مادية. إنها وجوديات أو تأثيرات تسبب حدوث أشياء معينة للمادة والطاقة على الرغم من أن هذه الحقول ليست ملموسة بنفسها.

جُسيْم أو موجة

السؤال هو "هل الحقل الكهرطيسي وابل من الجُسيْمات أو اضطراب موجة؟" لم تتم الإجابة عن هذا السؤال بشكل كامل وبدقة كبيرة. ولكن توجد علاقة بين طاقة الفوتون، وتردده، وطول موجته.

الطاقة، والتردد، وطول الموجة

يمكـــن إيجـــاد الطاقة المحتواة في فوتون واحد على شكل طاقة كهرطيسية بدلالة التردد بواسطة هذه الصيغة:

$$e = hf$$

حيث إنّ e الطاقة المحتواة في الفوتون (بالجول)، وf تردد اضطراب الموجة الكهرطيسية (بالهرتز)، وh ثابت يُعرف *بثابت بلانك*، وهو يساوي تقريبا 6.6262×10^{-34}.

إذا كان طول الموجة λ (بالمتر) معلوماً، وc سرعة انتشار الاضطراب الكهرطيسي (بالمتر بالثانية)، فإن

$$e = hc/\lambda$$

يمكن إعادة ترتيب الصيغة السابقة لتحديد طول موجة الفوتون بدلالة الطاقة التي يحويها:

$$\lambda = hc/e$$

بالنـــسبة للأشـــعة الكهرطيـــسية التي تنتشر في الفضاء الحر، فإن حاصل الضرب hc يساوي تقريباً 1.9865×10^{-25} لأن c تساوي تقريباً 2.99792×10^{8} m/s.

مسألة (17-5)

ما هي الطاقة المحتواة في فوتون الضوء المرئي، والذي يبلغ طول موجته 550 nm في الفضاء الحر؟

حل (17-5)

حــوِّل 550 nm إلى أمــتار؛ $550\ nm = 550 \times 10^{-9}\ m = 5.50 \times 10^{-7}\ m$. ثم استخدم صيغة الطاقة بدلالة طول الموجة:

$$e = hc/\lambda/$$
$$= (1.9865 \times 10^{-25})/(5.50 \times 10^{-7})$$
$$= 3.61 \times 10^{-19}\ J$$

مسألة (17-6)

ما هو طول الاضطراب الكهرطيسي الذي يتكون من فوتونات تملك جميعها 1.000×10^{-25} من الطاقة في الفضاء الحر؟

حل (17-6)

استخدم صيغة طول الموجة بدلالة الطاقة:

$$\lambda = hc/e$$
$$= (1.9865 \times 10^{-25})/(1.000 \times 10^{-25})$$
$$= 1.9865\ m$$

يصبح هذا مجال الترددات الراديوية العالية جداً (VHF). يمكنك حساب التردد الدقيق إذا أحببت.

تجارب الشق المضاعف

تنبــثق فوتــونات الحزمة الضوئية من المُزوِّد إذا أصبحت حزمة الضوء عاتمة بشكل كاف، بمجالات يمكــن قياسها بالثواني أو الدقائق أو الساعات أو السنين. إذا أصبحت حزمة الضوء ساطعة بشكل كاف، تهطل فوتوناتها بمعدل تريليونات بالثانية. يمكن كشف هذه الجُسيْمات وتحديد محتواها من الطاقة إذا كانت تتحــرك بــسرعة 2.99792×10^{8} m/s في الفــضاء الحر. ولكن، لا تشرح النظرية الجُسيْمية للإشعاع الكهرطيسي *الانكسار* بالشكل الذي يحدث على سطح جسم الماء. أخفقت نظرية الانكسار أيضاً في شرح ظواهــر الخفقــان والــتداخل الــتي نلاحظها في الضوء المرئي والجُسيْمات الذرية الجزئية عالية السرعة. استُخدمت *تجربة الشق المضاعف* التقليدية كبرهان على الطبيعة شبه الموجية للضوء المرئي. إن ما سيلي هو وصف بالغ التبسيط إلى حدّ ما لهذه التجربة.

ابتكــر الفيزيائي الإنكليزي المدعو توماس يونغ تجربة على أمل حل سؤال جُسيْم/موجة. أشع يونغ حزمة ضوئية لها لون محدد من مُزوِّد نقطي كامل تقريباً على حاجز فيه شقان ضيقان. وكان خلف الحاجز فــيلم تصوير (فوتوغرافي). اقترح يونغ أن الضوء سيمر من الشقين ويحط على الفيلم، منتجاً أشكالاً معينة. إذا كــان الــضوء مُكوَّناً من جُسيْمات، يجب أن يظهر التداخل على شكل خطين عاموديين ساطعين. إذا كــان الــضوء قطــاراً مــن الأمواج، يجب أن تظهر أشكال التداخل على شكل خطوط مُظلمة ومُضيئة بالتناوب. عندما نُفذّت التجربة، كان الحكم واضحاً: الضوء هو موجة اضطراب. ظهرت خطوط التداخل

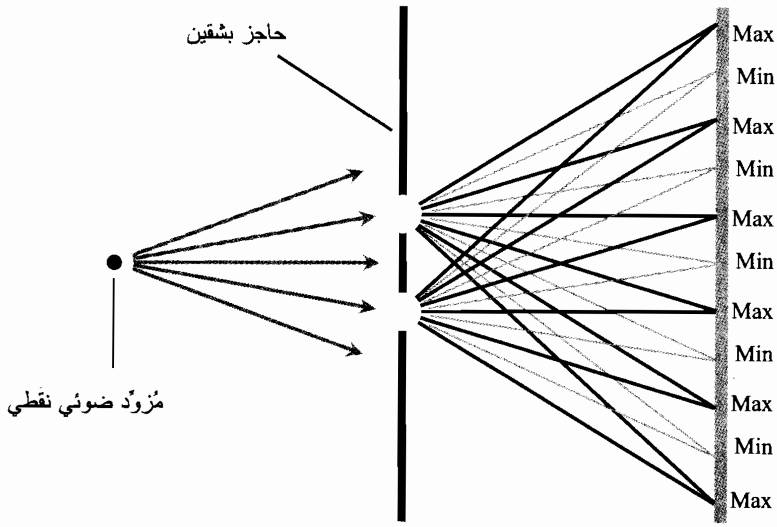
(الـــشكل (17-11))، لتشير إلى أن الموجة انعرجت بمرورها في الشقين. أُضيفت قمم وقواعد الأشعة المنعرجة بالتناوب وألغت بعضها عند وصولها إلى نقاط مختلفة في الفيلم. سيحدث ذلك مع موجة الاضطراب ولكن ليس مع سيل من الجُسيْمات؛ أو على الأقل ليس مع أي شكل من الجُسيْمات التي جرى تخيلها حتى هذا الوقت.

ولكن وضّحت تجارب أخرى بأن للضوء طبيعة جُسيْمية. ماذا عن الضغط الذي يبذله الضوء المرئي؟ مـــاذا عن اكتشاف إمكانية تقسيم الطاقة إلى رُزم (باكيتات) صغرى معينة؟ هل الضوء موجة وجُسيْم؟ أو أنه شيء آخر، شيء مختلف فعلياً ولكن يملك خصائص كل منهما؟

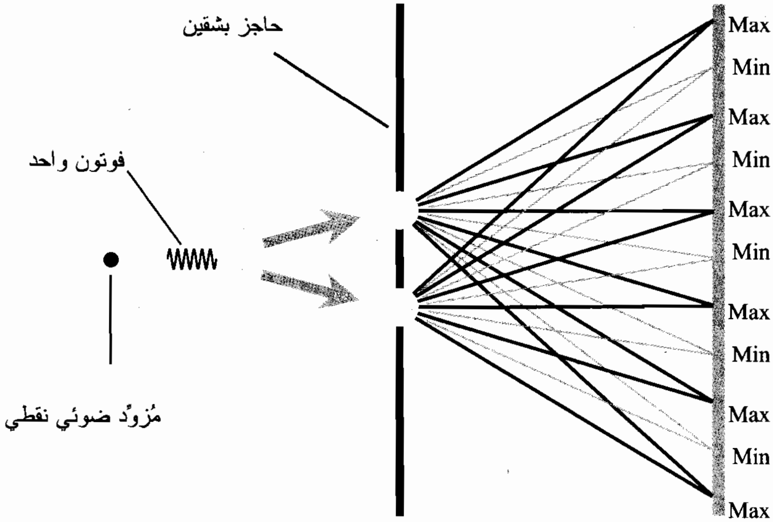
افترض أنه جرى قذف الفوتونات بقوة، فوتون إثر آخر على حاجز بشقين، وسُمح لها بأن تحط على سطح حساس؟ تم إجراء مثل هذه التجارب، وظهرت خطوط التداخل على السطح حتى لو كانت الحزمة ضـــيقة. حتى لو جعل المُزوِّد عاتماً جداً بحيث يصطدم بالسطح جُسيْم واحد فقط كل دقيقة، تظهر أشكال الخطـــوط المظلمة والمضيئة بعد فترة من الزمن بشكل كاف لعرض الفيلم (الشكل (17-12)). تتغيّر هذه الأشكال اعتماداً على المسافة بين الشقين، ولكن تبقى الأشكال نفسها من أجل جميع شدات الطاقة.

مـــاذا يحدث في تجارب كهذه؟ هل "تعلم" الفوتونات أين تحط على الفيلم اعتماداً على طول موجة الـــضوء الـــذي تُمثّله؟ كيف يمكن لفوتون واحد يمر عبر شق واحد "أن يتحقق" من المسافة بين الشقين، وبالـــتالي "معـــرفة" أين "يمكنه" أو "لا يمكنه" أن يحط على الفيلم؟ هل من الممكن أن تنفلق الفوتونات إلى شـــطرين وتمر في كلا الشقين في الوقت نفسه؟ هل تحدث التأثيرات بشكل عكسي في الزمن بحيث "تعلم" الفوتونات الصادرة عن مُزوِّد الضوء نوع الحاجز الذي ستمر فيه؟

للباحـــثين قـــول: "يـــستطيع مُنظّر واحد الحفاظ على ألف مُجرِّب مشغولين". تُظهر تجارب الشق المضاعف بأن العكس صحيح أيضاً. في السعي وراء المعرفة، فإن الارتداد لعبة منصفة.



الشكل (17-11): عند مرور الفوتونات في زوج من الشقوق في حاجز، تُنتج أشكال تداخل شبيهة بتداخل الأمواج.



الشكل (17-12): كيف تستطيع "جُسيْمات الموجة" المرور جُسيْم إثر جُسيْم في زوج من الشقوق وتستمر بإنتاج أشكال التداخل؟

امتحان موجز

عـــد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. جرى هيترودين موجتي راديو مع بعضهما، وكان تردد إحداهما 400.0 kHz وتردد الأخرى 1.250 MHz، أي من الترددات التالية يشكل تردد الخفقان؟

(a) 320.0 kHz

(b) 500.0 kHz

(c) 3.125 MHz

(d) 0.850 MHz

2. أي أنماط الأمواج التالية عبارة عن أمواج طولية؟

(a) التموجات على سطح المحيط

(b) الأمواج الكهرطيسية في الخلاء

(c) الأمواج الصوتية في الهواء

(d) الأمواج الجاذبة في الفضاء بين الكواكب

3. ما هو طول موجة اضطراب ترددها 500 Hz؟
   (a) 2.00 mm
   (b) 20.0 mm
   (c) 200 mm
   (d) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.
4. في أي من الأوضاع التالية تتوقع حدوث الانعراج بمداه الأعظم؟
   (a) أمواج الضوء المرئي حول سارية متعددة الاستخدامات
   (b) أمواج صوتية عالية الطبقة حول أهراء (صومعة) اسطوانية
   (c) أمواج صوتية منخفضة الطبقة حول زاوية بناء.
   (d) سيحدث الانعراج بمدى متساوٍ في جميع هذه السيناريوهات.
5. تُعتبر نظرية انكسار الضوء جيدة لشرح
   (a) الضغط الذي يبذله الشعاع الضوئي عند ارتطامه بعائق.
   (b) أشكال التداخل الناتجة في تجارب الشق المضاعف.
   (c) انكسار الضوء على سطح جسم مائي.
   (d) الطريقة التي يفلق الموشور بها الضوء إلى ألوان قوس قزح.
6. ما هو دور موجة كهرطيسية يبلغ طول موجتها 300 m وتنتشر في الفضاء الحر؟
   (a) 1.00×10^{-6} s.
   (b) 3.33×10^{-3} s.
   (c) 1.00×10^{6} s.
   (d) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.
7. الموجة الجيبية الصوتية
   (a) تمتد في مجال الترددات السمعية بكامله.
   (b) تُركِّز الصوت في تردد واحد.
   (c) موجة ذات طبقة عالية.
   (d) موجة ذات طبقة منخفضة.
8. ما هو طول موجة اضطراب كهرطيسي يتكون من فوتونات تملك جميعها 2.754×10^{-20} من الطاقة في الفضاء الحر؟
   (a) 7.213×10^{-6} m.
   (b) 5.471×10^{-6} m.

(c) 7.213×10^{-45} m.

(d) 5.471×10^{-45} m.

9. ما هي الطاقة المحتواة في كل فوتون في اضطراب صوتي تردده 700 Hz؟

(a) 4.64×10^{-31} J.

(b) 9.47×10^{-37} J.

(c) 0.00143 J.

(d) ليس للسؤال معنى؛ ليس للاضطرابات الصوتية فوتونات.

10. تنتشر الأمواج الصوتية بسرعة 335 m/s تقريباً في الغلاف الجوي للأرض على مستوى سطح البحر. ما هو طول موجة الاضطراب الصوتي ذو التردد 440 Hz؟

(a) 1.31 m

(b) 147 km

(c) 76.1 cm

(d) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

الفصل 18

أشكال الإشعاع

اعتقد اسحق نيوتن بأن الضوء المرئي مُكوَّن من جُسيْمات صغيرة جداً أو *جُسيْمات*. نُميِّز اليوم هذه الجُسيْمات بالفوتونات. ولكن، الضوء أكثر تعقيداً مما نستطيع تمثيله بالنظرية الجُسيْمية. فللضوء خصائص شبه موجية أيضاً. ينطبق الأمر نفسه على جميع أشكال الطاقة المشعّة.

الحقول الكهرطيسية

تنتج الطبيعة الموجية للطاقة المشعّة عن التفاعل بين الكهرباء والمغنطيسية. تكون الجُسيْمات المشحونة، كالإلكترونات والبروتونات، محاطة *بحقول كهربائية*. تُنتج الأقطاب المغنطيسية والجُسيْمات المشحونة المتحركة *حقولاً مغنطيسية*. عندما تكون الحقول قوية بشكل كاف، فإنها تمتد لمسافة كبيرة. عندما تتغيّر شدة الحقول المغنطيسية والكهربائية، يكون لدينا *حقل كهرطيسي* (*EM*).

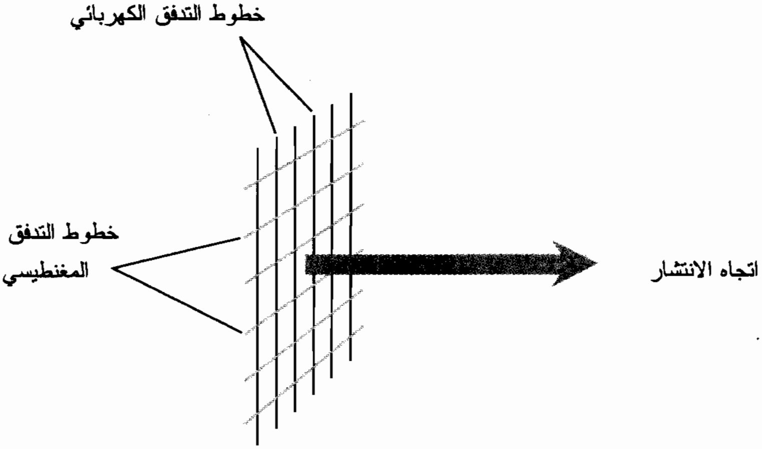
الحقول الساكنة

لاحظت التجاذب بين أقطاب المغانط المتعاكسة، والتنافر بين الأقطاب المتشابهة. تحدث تأثيرات مشابهة في الأجسام المشحونة كهربائياً. تبدو هذه القوى وكأنها تعمل ضمن مسافات قصيرة فقط وفي شروط المُختبر، وذلك بسبب ضعف هذه الحقول بسرعة، عند زيادة المسافة بين الأقطاب إلى أقل من الشدة الصغرى التي نستطيع تحسسها. نظرياً، تمتد الحقول في الفضاء بشكل لا نهائي.

يُنتج التيار الكهربائي المار في السلك حقلاً مغنطيسياً حول السلك. تكون *خطوط التدفق المغنطيسي عامودية* على اتجاه التيار. يُنتج فرق الجهد الثابت بين جسمين متجاورين حقلاً كهربائياً؛ تكون *خطوط التدفق الكهربائي* موازية لغراديان (تدرج) تفاضل الشحنة. عندما تتغيّر شدة التيار أو الجهد مع الزمن، تصبح الأمور أكثر متعةً.

الحقول المُتقلِّبة

يؤدي التيار المُتقلّب في السلك أو تدرج (غراديان) *الشحنة المتغيرة* بين جسمين متجاورين إلى ظهور حقــل مغنطيســي وحقــل كهربائي مترابطين. تتقدم هذه الحقول دورياً في الفضاء بحيث يستطيع الحقل الكهرطيسي الانتقال لمسافات طويلة بتخامد أقل من تخامد أي من الحقلين الكهربائي والمغنطيسي كل على حــدة. تكون الحقول الكهربائية والمغنطيسية في هذه الحالة متعامدة على بعضها في كل مكان في الفضاء. يكــون اتجــاه انــتقال الحقــل الكهرطيسي الناتج عامودياً على كل من خطوط تدفق الحقلين الكهربائي والمغنطيسي، كما هو موضح في الشكل (18-1).



الشكل (18-1): موجة كهرطيسية مُكوَّنة من خطوط التدفق المغنطيسي والكهربائي المُتقلِّبة والمتعامدة بشكل متبادل. ينتقل الحقل بشكل عامودي على كل من مجموعتي الخطوط.

بهــدف إنشاء الحقل الكهرطيسي، لا يجب فقط أن تتحرك الإلكترونات في السلك أو في ناقل آخر، بــل يجب أيضاً أن تتسارع. أي يجب أن يتغيّر شعاع سرعتها. إن الطريقة الأكثر شيوعاً لإنشاء هذا النوع مــن الحقــول هو بإدخال تيار متناوب (ac) في ناقل كهربائي. يمكن أن ينتج الحقل أيضاً عن انحناء حزم الجُسيْمات المشحونة بواسطة الحقول المغنطيسية أو الكهربائية.

التردد وطول الموجة

تنــتقل الأمــواج الكهرطيســية في الفــضاء بــسرعة الــضوء، والــتي تــساوي تقــريباً 2.99792×10^8 m/s (1.86262×10^5 mi/s). ويمكن تقريب هذا العدد عادةً بالتدوير إلى 3.00×10^8 m/s، مُعبَّــراً عنه بثلاثة أرقام هامة. يقصر طول الموجة الكهرطيسية في الفضاء الحر بازدياد التردد. عندما يكون تــردد المــوجة الكهرطيــسية مساوياً 1 kHz، يكون طول الموجة 300 km تقريباً. وعندما يكون التردد 1 MHz، يكون طول الموجة 300 m تقريباً. عندما يكون التردد 1 GHz، يكون طول الموجة 300 mm تقــريباً. وعندما يكون التردد 1 THz، يكون طول موجة الإشارة الكهرطيسية مساوياً 0.3 mm تقريباً؛ وهي موجة صغيرة جداً بحيث نحتاج إلى عدسة تكبير لرؤيتها.

يمكـــن أن يكون تردد الموجة الكهرطيسية أكبر من 1 THz؛ تبلغ أطوال أمواج بعض أكثر أشكال الأشعة شهرة وطاقة 0.00001 *أنغستروم* (10^{-5} Å). يكافئ الأنغستروم 10^{-10} m ويستخدم من قبل بعض العلمـــاء للإشارة إلى أطوال الأمواج الكهرطيسية بالغة القصر. ستحتاج إلى مجهر (ميكروسكوب) بقدرة تـــضخيم كبيرة لرؤية جسم طوله 1 Å. يفضل العلماء وبشكل مطرد هذه الأيام وحدة أخرى وهي *النانو* متر حيث إنّ $1\ \text{nm} = 10^{-9}\ \text{m} = 10\ \text{Å}$.

إن صيغة طول الموجة λ، مقدراً بالأمتار، كتابع للتردد f، مقدراً بالهرتز، لحقل كهرطيسي في الفضاء الحر هي

$$\lambda = 2.99792 \times 10^{8}/f$$

يمكن استخدام هذه الصيغة نفسها من أجل λ بالميلي متر وf بالكيلو هرتز، ومن أجل λ بالمايكرو متر وf بالميغا هرتز، ومن أجل λ بالنانو متر وf بالجيغا هرتز. تذكر بادئات المضاعفات: 1 ميلي متر (1 mm) يساوي 10^{-3} m، و1 مايكرو متر (1 µm) يساوي 10^{-6}، و1 نانو متر (1 nm) يساوي 10^{-9} m.

تُعطـــى صـــيغة التردد f، بالهرتز، كتابع لطول الموجة λ، بالمتر، لحقل كهرطيسي في الفضاء الحر عبر التبديل بين f وλ في الصيغة السابقة:

$$f = 2.99792 \times 10^{8}/\lambda$$

كمـــا في الحالـــة السابقة، ستعمل هذه الصيغة من أجل f بالكيلو هرتز وλ بالميلي متر، ومن أجل f بالميغا هرتز وλ بالمايكرو متر، ومن أجل f بالجيغا هرتز وλ بالنانو متر.

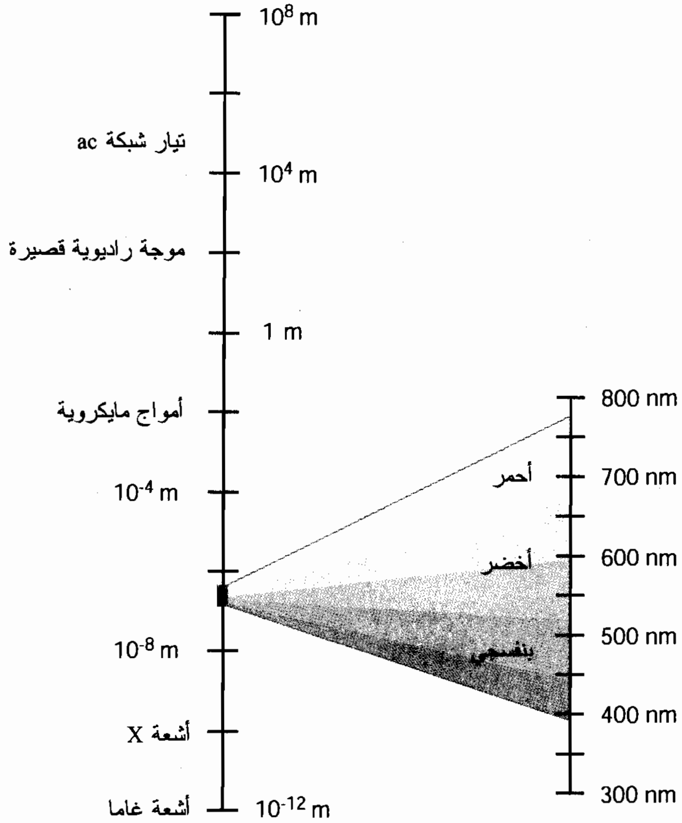
أشكال كثيرة

قـــاد اكتشاف الحقول الكهرطيسية في النهاية إلى نظم الاتصالات اللاسلكية المتنوعة التي نعرفها اليوم. لا تُعتبر *الأمواج الراديوية* الشكل الوحيد للإشعاع الكهرطيسي. عند زيادة التردد إلى تردد أكبر من التردد الراديوي الاصـــطلاحي، فإنـــنا نواجه أشكالاً جديدة. تأتي أولاً *الأمواج المايكروية*. ثم تأتي تحت الحمراء (IR) أو "أشعة الحرارة". يأتي بعدها الضوء المرئي، ثم الأشعة فوق البنفسجية (UV)، ثم أشعة x، ثم أشعة غاما (γ).

بـــشكل معاكس وأقل تخيلاً، يمكن أن تتواجد الحقول الكهرطيسية بترددات أقل بكثير من ترددات الإشارات الراديوية. نظرياً، يمكن للموجة الكهرطيسية أن تقوم بدورة واحدة كل ساعة، أو دورة كل يوم أو دورة كـــل ســـنة، أو دورة كـــل ألف سنة، أو دورة كل مليون سنة. يعتقد بعض الفلكيين أن النجوم والمجرات تُوَلِّد حقولاً كهرطيسية بأدوار تبلغ سنين أو قرون أو ألفية.

مقياس طول الموجة الكهرطيسية

نستخدم المقياس اللوغاريتمي لتوضيح مجال أطوال الأمواج الكهرطيسية. نستخدم المجال اللوغاريتمي بالفعل لأن المجال كبير جداً بحيث يكون المقياس الخطي غير عملي. يوضح الجزء اليساري من الشكل (18-2) وهو مقياس لوغاريتمي أطوال الأمواج من 10^{8} إلى 10^{-12} متر. تُمثّل كل تدريجة باتجاه طول الموجة الأقصر



الشكل (18-2): الطيف الكهرطيسي الذي تتدرج فيه الأطوال الموجية من أطوال موجية 108 m إلى 10^{-12} m ورؤية مكبرة فيه لطيف الضوء المرئي.

تناقصاً مقداره 100 أو مرتبتين. إن تيار الشبكة الرئيسية المتناوب قريب من قمة هذا المقياس؛ إن طول موجة ac ذات التردد 60 - Hz في الفضاء الحر كبير جداً. يُشار إلى أشعة غاما تقريباً في قاعدة المقياس؛ حيث يكون طول موجتها الكهرطيسية صغيراً جداً. من الواضح هنا أن الضوء المرئي يشغل فقط قطعة صغيرة جداً من *الطيف الكهرطيسي*. يُشار إلى أطوال الأمواج المرئية في المقياس اليميني بالنانو متر (nm).

كم هو صغير ما نراه!

للحصول على فكرة عن مدى صغر "النافذة" الكهرطيسية المُمثّلة بأطوال أمواج الضوء المرئي، حاول أن تبحث عن قطعة سيلوفان أو زجاج لونها أزرق أو أحمر. يُخفّض فلتر لوني كهذا بشكل كبير رؤيتك للعالم لأنه يسمح بمرور مجال ضيق من أطوال الأمواج المرئية فقط. لا يمكن التحقق من الألوان المختلفة عبر الفلتر. مثلاً، عند رؤية مشهد عبر فلتر أحمر، يكون كل شيء عبارة عن ظلال للأحمر أو القريب من الأحمر. يظهر الأزرق كالأسود، ويظهر الأحمر الناصع كالأبيض، ويظهر الأحمر الداكن

كالرمادي. تبدو الألوان الأخرى كالأحمر مشبعة بدرجات متغيرة، ولكن لا يوجد تغيّر أبداً أو يوجد تغيّــر بسيط في تدرج اللون. إذا كانت فلاتر اللون الأحمر مُبيّتة في أعيننا، سنكون في أفضل الأحوال مصابين بعمى الألوان.

عــند أخذ الطيف الكهرطيسي بكامله بالاعتبار، ستعاني جميع الأجهزة الضوئية من الصعوبات نفــسها التي سنعاني منها إذا كانت عدسات كرات عيوننا مُلوّنة بالأحمر. يتراوح مجال أطوال الأمواج الــتي نستطيع تحسسها بأعيننا من 770 nm تقريباً كأطول طول للموجة إلى 390 nm كأقصر طول للموجة. تظهر طاقة أطوال الأمواج المرئية الطويلة حمراء لأعيننا، وتظهر أطوال الأمواج المرئية القصيرة بنفــسجية لأعينــنا. تظهــر الأطــوال الموجية التي تقع بينهما بألوان البرتقالي، والأصفر، والأخضر، والأزرق، والنيلي.

مسألة (18-1)

ما هو تردد حزمة الليزر الأحمر والذي يبلغ طول موجته 7400 Å؟

حل (18-1)

اســتخدم صيغة التردد بدلالة طول الموجة. لاحظ أن $7400\ \text{Å} = 7400 \times 10^{-10}\ \text{m} = 7.400 \times 10^{-7}\ \text{m}$. إذاً يتم إيجاد التردد بالهرتز على الشكل التالي:

$$f = 2.99792 \times 10^{8}/\lambda$$
$$= 2.99792 \times 10^{8}/(7.400 \times 10^{-7})$$
$$= 4.051 \times 10^{14}\ \text{Hz}$$

تــساوي هذه النتيجة 405.1 THz. لإعطائك فكرة عن مدى كبر هذا التردد، قارنه بإشارة بث نموذجية مُعدَّلة ترددياً (FM) والتي يبلغ ترددها 100 MHz. إن تردد حزمة الضوء الأحمر أكبر من تردد الإشارة بأربعة ملايين مرة.

مسألة (18-2)

ما هو طول موجة حقل كهرطيسي في الفضاء الحر ناتج عن تيار خط الشبكة العامة المتناوب؟ خذ التردد 60.0000 Hz (بدقة ستة أرقام هامة).

حل (18-2)

استخدم صيغة طول الموجة بدلالة التردد:

$$\lambda = 2.99792 \times 10^{8}/f$$
$$= 2.99792 \times 10^{8}/60.0000$$
$$= 4.99653 \times 10^{6}\ \text{m}$$

يــساوي ذلك حوالى 5,000 km أو نصف المسافة من خط الاستواء الأرضي إلى القطب الجغرافي الشمالي مقاساً على سطح الكرة الأرضية.

حقول ELF

تُنتج الكثير من الأجهزة الإلكترونية والكهربائية حقولاً كهرطيسية. يكون طول موجة بعض الحقول أكـبر بكثير من أطوال الإشارات القياسية للبث وإشارات الاتصالات الراديوية. إن *ترددات هذه الحقول منخفضة جداً* ومن هنا ظهر اصطلاح *ELF*.

ما هو ELF

يـبدأ طـيف *ELF* تقنياً، من أصغر تردد الممكن (أقل من 1 Hz) ويمتد صعوداً إلى 3 kHz تقريباً. يوافـق ذلك أطوال موجية أطول من 100 km. يبلغ تردد حقل ELF الأكثر شيوعاً في العالم المعاصر 60 Hz. يجري إصدار أمواج ELF هذه بواسطة جميع أسلاك الشبكة الكهربائية العامة في الولايات المتحدة وفي العديد من دول العالم الأخرى. (يكون التردد في بعض الدول 50 Hz). يمتلك الجيش في منطقة البحيرات الكبرى في الولايات المتحدة، محطة ELF مستخدمة للاتصال بالغواصات. تنتقل أمواج ELF تحت الأرض وتحت الماء بفعالية أكثر من انتقال الأمواج الراديوية عند الترددات الأعلى.

قاد اصطلاح *إشعاع التردد المنخفض جداً* والاهتمام الذي لقيه من وسائل الإعلام، بعض الأشخاص للخـوف بشكل غير مبرر من هذا الشكل من الطاقة الكهرطيسية. إن حقل ELF ليس كوابل أشعة x أو أشـعة غامـا، التي يمكن أن تسبب المرض والموت إذا تم تلقيها بجرعات كبيرة. ولا تشبه طاقة ELF أشعة UV المـرتبطة بسرطان الجلد أو أشعة IR الكثيفة، التي يمكن أن تسبب الحروق. لن يقوم حقل ELF بأي نشاط إشعاعي. ومع ذلك يشك بعض العلماء بارتباط التعرض طويل الأمد لمستويات عالية من طاقة ELF بالنسب العالية وغير الطبيعية لحدوث مشاكل صحيحة معينة. إنه موضوع جدل هام حيث جرى تسييسه كأي قضية مشابهة.

المُزوِّدات العامة

يُعتـبر جهاز العرض العام ذو أنبوب الأشعة المهبطية من النوع المستخدم في الكمبيوترات الشخصية المكتبـية أحـد مُزوِّدات ELF التي لقيت دعاية كبيرة. (تُنتج أجهزة عرض CRT فعلياً طاقة كهرطيسية بتـرددات أعلـى، ولـيس ترددات ELF فقط). لا تُنتج الأجزاء الأخرى من الكمبيوتر الكثير من الطاقة الكهرطيسية. لا تنتج الكمبيوترات الصغيرة النقالة طاقة كهرطيسية بشكل أساسي.

يجـري في CRT، إنشاء المحارف والصور عند ارتطام حُزم الإلكترونات بالغطاء الفوسفوري داخل زجـاج CRT. تغيّر الإلكترونات اتجاهها باستمرار عندما تمسح الشاشة من اليسار إلى اليمين ومن الأعلى إلى الأسفل. ينتج المسح بواسطة ملفات انحراف توجه الحزمة الإلكترونية عبر الشاشة. تُوِّلد الملفات حقولاً مغنطيـسية تتفاعل مع الإلكترونات المشحونة بشحنة سالبة، لتجبرها على تغيير اتجاهها. تتقلب الحقول إذاً بتـرددات منخفضة. بسبب وضع الملفات وأشكال الحقول المحيطة بها، يوجد الكثير من الطاقة الكهرطيسية "المشعّة" من جوانب صندوق جهاز عرض CRT أكثر من الطاقة الكهرطيسية المشعّة من الواجهة. وبالتالي

إذا وجـــدت مجازفة حقيقية ناتجة عن ELF، ستكون هذه المجازفة كبرى بالنسبة لشخص يجلس إلى جانب جهاز العرض وصغرى بالنسبة لشخص يشاهد الشاشة من الأمام.

الحماية

تتحقق أفضل "حماية" من طاقة ELF بالابتعاد فيزيائياً. وهذا صحيح أيضاً بالنسبة للأشخاص الذين يجلسون مقابل شاشة الكمبيوتر المكتبي (حتى لو كانوا يجلسون أمامه). يتلاشى الحقل بسرعة بالابتعاد عن صـــندوق الشاشة. يجب أن تتباعد الكمبيوترات الكبيرة في بيئة المكتب عن بعضها مسافة 1.5 m (حوالى 5 ft) على الأقل. يمكن إيقاف تشغيل جهاز العرض إذا لم يكن في حالة الاستخدام.

تتوفـــر أجهزة عرض جرى تصميمها بشكل خاص لتصغير حقول ELF. على الرغم من أنها مكلفة، إلاّ أنهـــا تقدم السلام الذهني للأشخاص المهتمين بالتأثيرات الصحية المحتملة بعيدة الأمد الناتجة عن التعرض لحقول ELF.

سترى في بعض الأحيان أجهزة مُسوقة مع ادعاءات بحذف ELF أو تخفيفها بشكل كبير. بعض هذه الأجهـــزة فعـــال والبعض الآخر لا. لن توقف الشاشات الإلكتروستاتيكية التي تضعها أمام زجاج جهاز العرض، كي لا تجذب الغبار، لن تُوقف حقول ELF. ولن توقفها حتى فلاتر الضوء الباهر.

جذبت قضية ELF انتباه وخوف القاصي والداني، وجذبت كذلك اهتمام العلماء المشروع. من الأفضل تجنب إصدارها أكثر مما يجب، وعدم الخضوع لضجيج وسائل الإعلام غير المبرر. إذا كنت مهتماً بإشعاع ELF في منـــزلك أو في بيئة عملك، استشر أحداً تثق بكلامه، كمهندس عتاد كمبيوتر أو مهندس اتصالات لاسلكية.

أمواج RF

يدعى الاضطراب الكهرطيسي *بالتردد الراديوي (rf)* إذا تراوح طول الموجة بين 100 km و1 mm. أي إذا تراوح التردد بين 3 kHz و3000 GHz.

المُحددات الرسمية لحزمة RF

ينقسم طيف rf إلى ثمان حزم، حيث تمثل كل حزمة مرتبة واحدة بدلالة التردد وطول الموجة. تدعى هذه الحزم *بالترددات المنخفضة جداً، والمنخفضة، والمتوسطة، والعالية، والعالية جدا، وفوق العالية، والفائقة العلـــو، والعالـــية للغاية*. وهي تُختَصر بالترتيب VLF، وLF، وMF، وHF، وVHF، وUHF، وSHF، وEHF. وهي مدونة في الجدول (18-1) بدلالة التردد وطول الموجة في الفضاء الحر.

تـــوجد أسمـــاء بديلة لهذه الحزم. تدعى الطاقة في حزم VLF وLF *بالأمواج الراديوية الطويلة أو الأمواج الطويلة*. تدعى طاقة حزم HF في بعض الأحيان *بالأمواج الراديوية القصيرة أو الأمواج القصيرة* (حتى لو لم تكن قصيرة في معظم الأمواج الكهرطيسية المستخدمة اليوم في الاتصالات اللاسلكية). تدعى الأمواج الراديوية ذات الترددات الفائقة العلو والأمواج ذات الترددات العالية للغاية في بعض الأحيان *بالأمواج المايكروية*.

الجدول (18-1): حزم طيف الترددات الراديوية (*rf*). تمتد كل حزمة مرتبة رياضية واحدة بدلالة التردد وطول الموجة.

المُحدِّد	التردد	طول الموجة
الترددات المنخفضة جداً (VLF)	kHz 30–3	km 10–100
الترددات المنخفضة (LF)	kHz 300–30	km 1–10
الترددات المتوسطة (MF)	MHz3 – KHz 300	m 100 – km 1
الترددات العالية (HF)	MHz 30–3	m 10–100
الترددات العالية جداً (VHF)	MHz 300–30	m1–10
الترددات فوق العالية (UHF)	GHz3 – MHz 300	mm 100 – m 1
الترددات الفائقة العلو (SHF)	GHz 30–3	mm 10–100
الترددات العالية للغاية (EHF)	GHz 300–30	mm 1–10

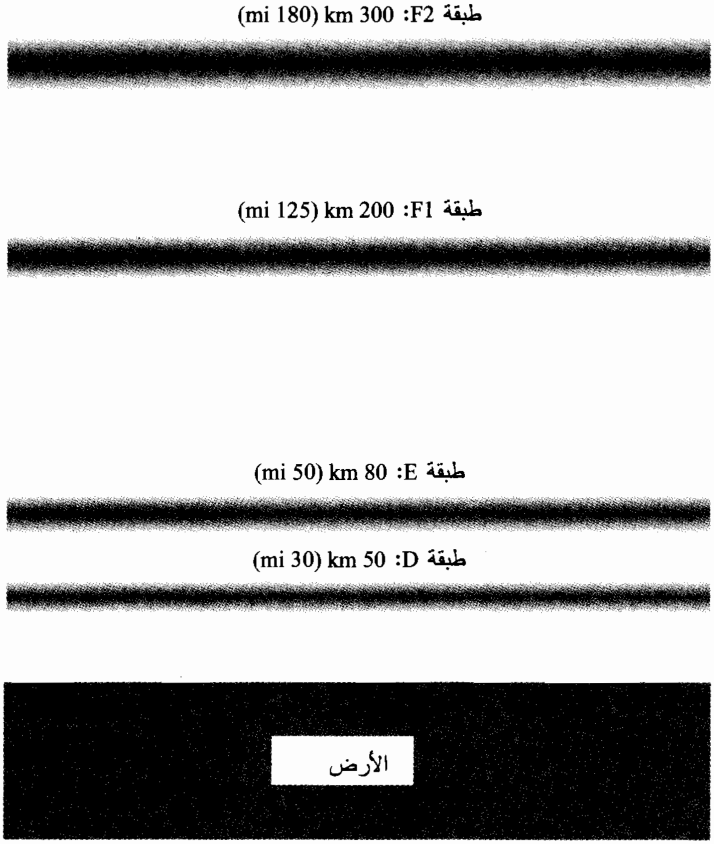
تنتشر الأمواج ذات الترددات الراديوية في الغلاف الجوي للأرض وفي الفضاء بأشكال متنوعة، تعتمد على طول الموجة. تتأثر بعض الأمواج بالأيونسفير؛ وينطبق ذلك بشكل خاص على VLF، وLF، وMF، وHF. تستطيع طبقة التروبوسفير حني أو عكس أو نثر أمواج VHF، وUHF، وSHF، وEHF

أيونسفير الأرض

يصبح الغلاف الجوي لأرضنا أقل كثافة بزيادة الارتفاع. وبسبب ذلك تكون الطاقة المستقبلة من الشمس أكبر بكثير في الارتفاعات العالية منه على سطح الأرض. تسبب الجُسيْمات الذرية الجزئية عالية السرعة كأشعة UV، وأشعة x تأين الغازات النادرة في الغلاف الجوي العلوي. تحدث المناطق المؤينة على ارتفاعات محددة وتضم *الأيونسفير*. تمتص طبقة الأيونسفير وتعكس الأمواج الراديوية. يسمح ذلك بتحقيق الاتصالات بعيدة المسافة أو يجعل استقبال بعض الترددات الراديوية ممكناً.

يحدث التأين في الغلاف الجوي العلوي في أربع طبقات غير واضحة. تُدعى أخفض منطقة *بالطبقة D*. وهي موجودة على ارتفاع يبلغ 50 km (30 mi) تقريباً وهي موجودة بشكل طبيعي فقط أثناء النهار. لا تسهم هذه الطبقة في الاتصالات الراديوية بعيدة المسافة، بل تمنعها في بعض الأحيان. تتواجد الطبقة E على ارتفاع يبلغ 80 km (50 mi) تقريباً فوق سطح الأرض، وتوجد بشكل رئيسي أثناء النهار، على الرغم من ملاحظة التأين في الليل في بعض الأحيان. تُسهِّل الطبقة E الاتصالات الراديوية المتوسطة في ترددات معينة. تدعى الطبقات الأعلى *الطبقة* $F1$ *والطبقة* $F2$. تتواجد الطبقة $F1$ بشكل طبيعي في الجانب المُضاء من الأرض، وتتشكل على ارتفاع يبلغ 200 km (125 mi). تتواجد الطبقة $F2$ أكثر أو أقل ليلاً نهاراً، على ارتفاع 300 km (180 mi) فوق سطح الأرض. في الجانب المظلم من الأرض، عندما تختفي الطبقة $F1$، تدعى الطبقة $F2$ ببساطة *بالطبقة* F.

يوضـــح الـــشكل (18-3) الارتفاعات النسبية للطبقات الأيونسفيرية *D*، *E*، *F*1، *F*2 فوق سطح الأرض. تؤثر جميع هذه الطبقات بعض الشيء على طريقة انتقال الأمواج الراديوية ذات الترددات المنخفضة جداً، والمنخفضة والمتوسطة والعالية. يمكن ملاحظة التأثيرات الأيونسفيرية حتى في قسم من ترددات VHF من الطيف الراديوي. لا تجعل هذه الطبقات الاتصالات اللاسلكية بعيدة المسافة ممكنة فقط بين نقطتين على سطح الأرض؛ بل إنها تمنع أيضاً الأمواج الراديوية ذات الترددات الأخفض من 5 MHz تقريباً من الوصول للسطح من الفضاء الخارجي.



الشكل (18-3): طبقات الأيونسفير الأرضية. تؤثر هذه المناطق المؤينة على سلوك الأمواج الكهرطيسية لبعض الترددات الراديوية.

النشاط الشمسي

إن عـــدد البقع الشمسية ليس ثابتاً بل يتغيّر من سنة إلى سنة. يكون التغير دورياً وكبيراً جداً. يدعى هذا التقلب في أعداد البقع الشمسية *بدورة البقع الشمسية*. ويبلغ دورها 11 سنة تقريباً. يكون ازدياد عدد

البقع الشمسية عادةً أكثر سرعة من نقصانها، وتتغير الأعداد العظمى والصغرى للبقع الشمسية من دورة إلى دورة.

تؤثر دورة البقع الشمسية على شروط انتشار الترددات حتى 70 MHz في الطبقات $F1$ و$F2$، وتؤثر علـــى انتشار الأمواج ذات الترددات الواقعة بين 150 و200 MHz للانتشار في الطبقة E. عندما لا يكون هـــناك الكـــثير من البقع الشمسية، يكون *التردد الأعظم القابل للاستخدام* (MUF) (أو تردد الاستخدام الأعظمـــي) منخفـــضاً نـــسبياً لأن تأين الغلاف الجوي العلوي ليس كثيفاً. يكون MUF في ذروة البقعة الشمسية أو بالقرب منها، أعلى لأن الغلاف الجوي العلوي أكثر تأيناً.

الانفجار الشمسي هو عاصفة عنيفة على سطح الشمس. تسبب الانفجارات الشمسية زيادة في مستوى الضجيج الراديوي القادم من الشمس، ويؤدي لإرسال الشمس لكمية متزايدة من الجُسيْمات الذرية الجزئية عالية الـــسرعة. تتحـــرك هذه الجُسيْمات في الفضاء وتصل للأرض بعد ساعات من الظهور الأول للانفجار. بما أن الجُـــسيْمات مشحونة كهربائياً، فهي تتسارع بواسطة الحقل المغنطيسي الأرضي. تنتج في بعض الأحيان *عاصفة شمـــسية أرضـــية*. وبالتالي نرى "الأضواء الشمالية" أو "الأضواء الجنوبية" على ارتفاعات عالية أثناء الليل حيث تؤدي لتدهور مفاجئ في شروط الانتشار الراديوي في الأيونسفير. يمكن أن تنقطع الاتصالات في بعض الترددات لبضع ثوان. حتى دارات الاتصالات السلكية تتأثر في بعض الأحيان.

يمكن أن تحدث الانفجارات الشمسية في أي وقت، ولكن يبدو أنها تحدث غالباً في الفترة القريبة من ذروة دورة البقع الشمسية الإحدى عشرية. لا يعلم العلماء بالضبط ما يسبب الانفجارات الشمسية، ولكن تبدو الحوادث مترابطة مع العدد النسبي للبقع الشمسية.

انتشار الموجة الأرضية

في الاتـــصالات الراديوية، تتكون *الموجة الأرضية* من ثلاث مُركّبات منفصلة: *الموجة المباشرة* (تدعى أيضاً *بموجة خط النظر*)، *والموجة المنعكسة*، *والموجة السطحية*. تنتقل الموجة المباشرة وفق خط مستقيم. إنها تلعب دوراً كبيراً فقط عندما تكون هوائيات الإرسال وهوائيات الاستقبال على خط هندسي مستقيم تماماً فـــوق سطح الأرض. تتخامد الحقول الكهرطيسية لمعظم الترددات الراديوية بشكل ضعيف عند مرورها في أجسام مثل الأشجار وأسيجة المنازل. تؤدي الأبنية الإسمنتية والفولاذية بعض الفقدان في الموجة المباشرة في الترددات الأعلى. تُعيق الحواجز الأرضية كالتلال والجبال الموجة المباشرة.

يمكن أن تنعكس الإشارة الراديوية عن الأرض أو عن أبنية معينة كالأبنية الإسمنتية والفولاذية. تتحد الموجة المنعكـــسة مع الموجة المباشرة (إذا وجدت) في أي هوائي استقبال. تكون الموجتان في بعض الأحيان مختلفتين في الطـــور، وفي هـــذه الحالة تكون الإشارة المُستقبَلة ضعيفة حتى لو كان المرسل والمستقبل على خط نظر مباشر. يحدث هذا التأثير غالباً في الترددات الأعلى من 30 MHz (ذات الأطوال الموجية الأقل من 10 m).

تنـــتقل الموجة السطحية مماسةً للأرض، وتشكل الأرض جزءاً من الدارة. يحدث ذلك فقط في حقول EM المـــستقطبة عامودياً (الحقول التي تكون خطوط التدفق الكهربائي عامودية) في الترددات الأخفض من

15 MHz. لا يوجد في الترددات الأعلى من 15 MHz موجة سطحية بشكل أساسي. تنتشر الموجة السطحية لمئات أو حتى آلاف الكيلومترات في الترددات بين 9 kHz وحتى 300 kHz. تدعى الأمواج السطحية في بعض الأحيان بالأمواج الأرضية، ولكن يُعتبر ذلك تقنياً استعمالاً مغلوطاً للاسم.

انتشار E المتشتت

تُعيد الطبقة الأيونسفيرية E أحياناً إشارات ذات ترددات راديوية معينة إلى الأرض. إن هذا التأثير متشتت، ويمكن أن تتغيّر الشروط بسرعة. لهذا السبب يدعى هذا النمط من الانتشار *بانتشار E المتشتت*. يكون احتمال حدوثه كبيراً في الترددات التي تقع بين 20 و150 MHz تقريباً. ويُلاحظ هذا النمط من الانتشار أحياناً في ترددات تصل إلى 200 MHz. يكون مجال الانتشار من رتبة عدة مئات من الكيلومترات، ولكن يمكن تحقيق الاتصالات أحياناً في مسافات تتراوح بين 1,000 km إلى 2,000 km (600 إلى 1,200 mi).

تتأثر حزمة بث FM القياسية في بعض الأحيان بانتشار E المتشتت. ينطبق الأمر نفسه على قنوات البث التلفزيوني (TV) المنخفضة، وخاصة القنوات 2 و3. يتأثر انتشار E المتشتت في بعض الأحيان في الغلاف الجوي المنخفض بشكل سيئ وذلك بشكل مستقل عن الأيونسفير ذي تأثيرات سيئة.

انتشار أورورا والنيزك - المنتثر

بوجود نشاط شمسي غير عادي، تعكس الأورورا عادةً بعض ترددات الأمواج الراديوية. يدعى ذلك *بانتشار الأورورا*. تحدث الأورورا في الأيونسفير على ارتفاع يتراوح بين 25 km (40 mi) و400 km (250 mi) فوق السطح. نظرياً، يكون انتشار الأورورا ممكناً، عندما تكون الأورورا نشطة، بين أي نقطتين من سطح الأرض واقعتين على خط نظر وضمن القسم نفسه من الأورورا. قلما يحدث انتشار الأورورا عندما تكون زاوية الطول الجغرافي لأي من المرسل أو المستقبل أصغر من 35 درجة شمال أو جنوب خط الاستواء. يمكن أن يحدث انتشار الأورورا في الترددات الأكبر من 30 MHz، ويكون مترافقاً عادةً بتدهور في الانتشار الأيونسفيري عبر طبقات E وF.

عندما يدخل نيزك من الفضاء إلى القسم العلوي من الغلاف الجوي، ينتج ممر مؤين بسبب حرارة الاحتكاك. تعكس هذه المنطقة المؤيّنة الطاقة الكهرطيسية من أجل أطوال موجية معينة. يمكن أن تؤدي هذه الظاهرة، والتي تُعرف *بانتشار النيزك المتناثر*، إلى الاستقبال أو تحقيق الاتصالات الراديوية فوق الأفق.

يُنتج النيزك ممراً يستمر لمدة تتراوح بين بضعة أعشار من الثانية إلى بضع ثوان اعتماداً على حجم النيزك، وسرعته، وزاوية دخوله إلى الغلاف الجوي. تُعتبر هذه الكمية من الزمن غير كافية لإرسال الكثير من المعلومات، ولكن أثناء وابل من النيازك يمكن أن يكون التأين مستمراً تقريباً. تم ملاحظة انتشار النيزك المتأين في الترددات الأعلى بكثير من 30 MHz، وتحدث فوق مسافات تتراوح من خلف الأفق وإلى 2,000 km (1,200 mi) اعتماداً على ارتفاع الممر المؤين وعلى المواضع النسبية للممر، وعلى محطة الإرسال، ومحطة الاستقبال.

الانحناء التروبوسفيري

يضم أخفض قسم من الغلاف الجوي الأرضي والذي يتراوح ارتفاعه بين 13 و20 km أو (8– 12 mi) *منطقة التروبوسفير*. تؤثر هذه المنطقة على انتشار الأمواج الراديوية من أجل ترددات معينة. يمكن أن يحدث الانعكاس والانكسار في الكتل الهوائية ذات الكثافة المختلفة وفيما بينهما في الأطوال الموجية الأقصر من 15 m تقريباً (ذات الترددات الأعلى من 20 MHz). يؤدي الهواء أيضاً لتناثر بعض الطاقة الكهرطيسية في الأطوال الموجية الأقصر من 3m تقريباً (ذات الترددات الأكبر من 100 MHz). تُعرف جميع هذه التأثيرات عموماً بالانتشار التروبوسفيري، والذي يمكن يؤدي لتحقيق الاتصالات عبر مسافات تمتد لمئات الكيلومترات.

يحدث النمط الشائع للانتشار التروبوسفيري عند انكسار الأمواج الراديوية في أسفل الغلاف الجوي. يكون هذا الانكسار أكبر ما يمكن بجوار جبهات الطقس، حيث يكون الهواء ساخناً وأكثر كثافة، يتموضع الهواء الخفيف نسبياً فوق الهواء البارد. تكون قرينة انكسار الهواء البارد أكبر من قرينة انكسار الهواء الساخن، يؤدي ذلك لانحناء الحقول الكهرطيسية للأسفل على بعد مسافات كبيرة من المرسل. إنه *الانحناء التروبوسفيري* المسؤول عادةً عن الشذوذ في استقبال إشارات البث FM وTV.

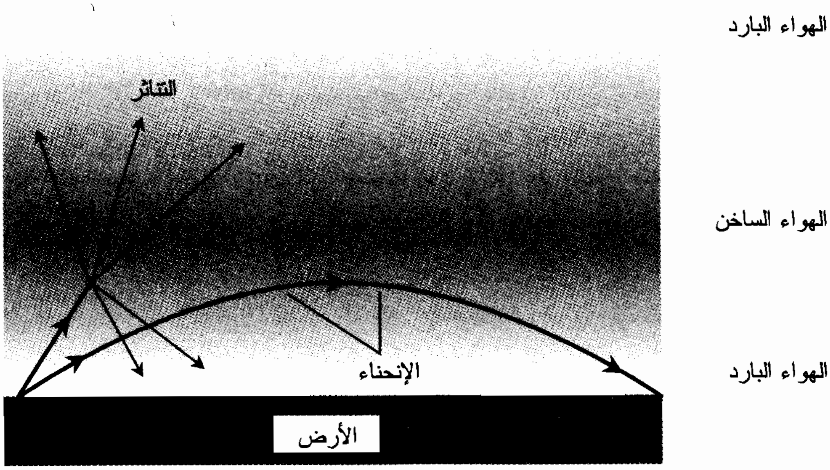
التناثر التروبوسفيري

يكون للغلاف الجوي تأثير تناثري على الأمواج الراديوية في الترددات الأعلى من 100 MHz. يسمح التناثر بتحقيق الاتصالات فوق الأفق في ترددات VHF، وUHF، والترددات المايكروية. وتدعى *بالتناثر التروبوسفيري*. تزيد السحب والغبار من التأثير التناثري، ولكن يحدث بعض التناثر التروبوسفيري بغض النظر عن الطقس. يحدث التناثر التروبوسفيري عادةً على ارتفاعات منخفضة حيث يكون الهواء أكثر كثافة. تحدث بعض التأثيرات على ارتفاعات تصل إلى 16 km (10 mi). يستطيع التناثر التروبوسفيري تأمين اتصالات موثوقة عبر مسافات تبلغ بضع مئات من الكيلومترات عند استخدام المعدات المناسبة.

يوضح الشكل (18–4) التناثر التروبوسفيري والانحناء. إن محطة الإرسال في أسفل اليسار. يوجد انعكاس حراري في هذا المثال؛ إنه يُضخِّم الانحناء. إذا كان الحد الفاصل بين الهواء البارد الموجود بالقرب من السطح والهواء الساخن فوقه مُحدّداً بشكل جيد وكاف، يمكن أن يحدث الانعكاس بالإضافة إلى الانحناء. إذا غطى الانعكاس منطقة جغرافية كبيرة، يمكن أن تتأرجح الإشارات بين حدّ الانعكاس والسطح، مُزوِّدة باتصالات استثنائية طويلة – المجال، خاصة إذا كان السطح ماء مالحاً.

تأثير المجرى

إنّ *تأثير المجرى* هو أحد أشكال الانتشار التروبوسفيري الذي يحدث في ترددات الانحناء والتناثر نفسها تقريباً. يدعى هذا الانتشار أيضاً *بانتشار المجرى*، ويكون هذا الشكل من الانتشار أكثر شيوعاً بالقرب من السطح، وفي بعض الأحيان على ارتفاعات أقل من 300 m.



الشكل (18-4): يستطيع التروبوسفير حني ونثر الأمواج الراديوية في بعض الترددات.

يتشكل *المجرى* عندما تصبح طبقة من الهواء البارد بين طبقتين من الهواء الساخن. المجرى شائع على طول وبالقرب من جبهات الطقس في زوايا العرض الجغرافي المعتدلة. ويحدث أيضاً بشكل متكرر فوق السطوح المائية أثناء ساعات النهار، وفوق السطوح الأرضية في الليل. يمكن أن تُحبس الأمواج الراديوية داخل منطقة من الهواء البارد، بالطريقة نفسها التي تُحبس بها الأمواج الضوئية داخل الليف الضوئي. يسمح المجرى عادةً بتحقيق الاتصالات فوق الأفق بنوعية استثنائية عبر مسافات تمتد لمئات من الكيلومترات وذلك في ترددات VHF وUHF.

مسألة (18-3)

افترض أنك تستخدم مستقبل راديو محمولاً باليد للتحدث إلى شخص ما عبر المدينة. أنت تقف على تلة وتستطيع رؤية المنزل الذي يتواجد فيه الشخص الآخر، وكلاكما موجود ضمن مجال الاتصالات بالراديو. لكن رغم ذلك الإشارة ضعيفة للغاية. تحركت بضعة أمتار، وأصبحت الإشارة أقوى. ماذا يكون سبب ذلك؟

حل (18-3)

إنّ ما حصل هو أن الموجة المباشرة والموجة المنعكسة من هوائي الراديو الآخر وصلتا متعاكستين في الطور، وبالتالي فقد ألغيتا بعضهما على الأغلب. صحح الانتقال لبضعة أمتار ذلك، وأصبحت الإشارة أقوى.

ما بعد الطيف الراديوي

يبلغ قياس أقصر أمواج rf تقريباً 1 mm؛ يوافق ذلك تردداً مقداره 300 GHz. عندما يصبح طول الموجة أقصر من ذلك، فإننا نجد IR، والضوء المرئي، وUV، وأشعة x، موزعة طيفياً وفق ذلك الترتيب.

تحت الحمراء

إن طول أطول موجة IR يبلغ 1 mm تقريباً؛ يبلغ طول موجة الضوء المرئي الأشد احمراراً أقل بقليل من 0.001 mm. إنه مجال من ألف أو من ثلاث مراتب رياضية. بدلالة التردد، يقع طيف IR تحت طيف الأحمر المرئي، ويأخذ اسمه من هذه الحقيقة. تتحسس أجسامنا إشعاع IR على شكل سخونة أو على شكل حـــرارة. لا تُمثّل أشعة IR حرارة بشكل حرفي، ولكنها تُنتج الحرارة عند اصطدامها بجسم ماص كالجسم البشري.

الـــشمس هي مُزوِّد رائع لأشعة IR؛ إنها تصدر IR بقدر ما تصدر من ضوء مرئي. تتضمن مُزوِّدات IR الأخرى المصابيح الضوئية المتوهجة، والنار، وعناصر التسخين الكهربائية. إذا كان لديك مدفأة كهربائية ومفتاح تبديل على أحد مُضرماتها، يمكنك أن تشعر بإشعاع IR منها حتى لو ظهر العنصر أسود للعيان.

يمكـــن كشف إشعاع IR بواسطة أفلام خاصة يمكن استخدامها في معظم الكاميرات العادية. يوجد علـــى بعض الكاميرات الفوتوغرافية أعداد لتركيز IR وكذلك لتركيز الضوء المرئي وهذه الأعداد مطبوعة علـــى أدوات الـــتحكم بالعدسات. يُمرر الزجاج IR ذات الأطوال الموجية القصيرة (IR *القريبة*) ولكنه يحجب IR ذات الأطوال الموجية الطويلة (IR *البعيدة*). عندما تأخذ صورة بالأشعة تحت الحمراء في ظلمة الضوء المرئي، تظهر الأجسام الساخنة بوضوح. إنه مبدأ عمل بعض أجهزة الرؤية الليلية. تُستخدم معدات الكشف بالأشعة تحت الحمراء في الحروب لكشف وجود وحركة الأشخاص.

إن حقيقة أن الزجاج يُمرر IR القريبة ويحجب IR البعيدة مسؤولة عن قدرة البيوت الزجاجية على الحفاظ على الحرارة الداخلية بحيث تكون الحرارة أعلى من حرارة البيئة الخارجية. وهي المسؤولة أيضاً عن التـــسخين الهائل الذي يحدث داخل المركبات في الأيام المشمسة عندما تكون النوافذ مغلقة. يمكن استخدام هـــذا التأثير للاستفادة منه في المنازل ذات الطاقة الفعالة وفي أبنية المكاتب. يمكن تزويد النوافذ الكبيرة من جهة الجنوب بستائر تفتح في أيام الشتاء المشمسة وتُغلَق في الطقس الغائم وفي الليل.

إن إشـــعاع IR بمـــستويات منخفضة ومتوسطة ليس خطيراً، وقد استخدم حقيقة في العلاج الطبي للمساعدة في تسكين الألم الخفيف الناتج عن المفاصل وتوتر العضلات. ولكن عندما تكون شدة إشعاع IR عالـــية فـــيمكن أن تـــسبب حروقاً. يمكن أن يسبب هذا الإشعاع حرائق في الغابات أو حرائق في الأبنية الـــضخمة ويمكن أن يحرق ملابس الشخص ويمكن أن يطبخ الجسم حياً دون أي مبالغة. ينتج إشعاع IR الأكثر ضخامة على الأرض بواسطة انفجار القنبلة الذرية أو بواسطة اصطدام كويكب. يمكن لانفجار IR الـــناجم عن سلاح 20 ميغا طن (يكافئ 2×10^7 من المواد المتفجرة التقليدية) أن يقتل كل الأعضاء الحية المُعرّضة له ضمن دائرة نصف قطرها بضعة كيلومترات.

يكون الغلاف الجوي لكوكبنا شافاً (غير شفاف) لبعض أجزاء طيف IR. يكون غلافنا الجوي نظيفاً بـــشكل معقول من IR القريبة التي تقع أطوالها الموجية بين 770 nm (الأحمر المرئي) و2,000 nm تقريباً. يـــسبب بخار الماء تخامد IR التي تتراوح أطوالها الموجية بين 4,500 و8,000 nm تقريباً. يشوش غاز ثاني أوكـــسيد الكـــربون (CO_2) على إرسال IR في أطوال موجية تتراوح بين 14,000 وبين 16,000 nm. يـــتداخل المطـــر، والثلج، والضباب، والغبار مع IR. يُحافظ وجود CO_2 في الغلاف الجوي على السطح

ســـاخناً أكثـــر مما لو كان CO_2 موجوداً بشكل أقل. يتفق معظم العلماء على أن زيادة CO_2 في الغلاف الجوي سينتج ارتفاعاً كبيراً في متوسط درجة حرارة سطح الأرض. إنّ تأثير البيت الزجاجي الذي أخذ اسمه من حقيقة عمل CO_2 في الغلاف الجوي للأرض مشابه إلى حدّ كبير للزجاج في البيت الزجاجي.

الضوء المرئي

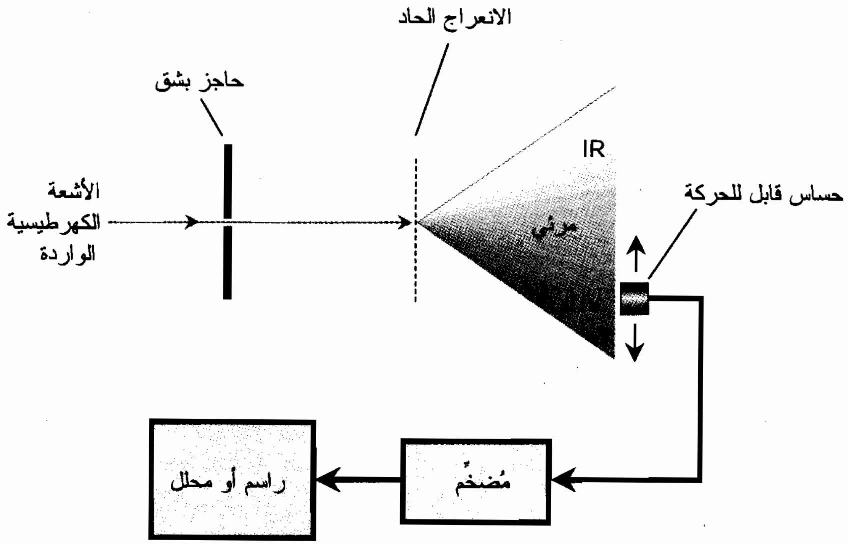
يقـــع الجزء المرئي من الطيف الكهرطيسي ضمن أطوال موجية تتراوح بين 770 و390 nm. تظهر الأطوال الموجية الطويلة حمراء؛ وبتناقص طول الموجة، نشاهد البرتقالي، ثم الأصفر، ثم الأخضر، ثم الأزرق، ثم اللازوردي، ثم البنفسجي بالترتيب.

يجري إرسال الضوء المرئي بشكل جيد جداً في الغلاف الجوي وبجميع الأطوال الموجية. يزداد التناثر باتجـــاه الأزرق، واللازوردي والبنفسجي في نهاية الطيف. وهذا هو سبب ظهور السماء زرقاء أثناء النهار. يتناثـــر الضوء ذو طول الموجة الطويل بشكل أقل؛ وهذا هو سبب ظهور الشمس حمراء أو برتقالية عندما تكـــون عند الأفق. وللسبب نفسه يكون الأحمر هو اللون المفضل في نظم الاتصالات الليزرية الأرضية وفق خـــط النظـــر. يـــشوش المطر، والثلج، والضباب، والدخان، والغبار على إرسال الضوء المرئي في الهواء. سنتعرض بالتفصيل لخصائص وسلوك الضوء المرئي في الفصل التالي.

فوق البنفسجية

عندما يصبح طول موجة اضطراب EM أقصر مما نستطيع أن نراه، تزداد الطاقة المحتواة في كل فوتون على حدة. يبدأ مجال طول أمواج UV من 390 nm تقريباً ويهبط إلى حوالى 1 nm تقريباً. يصبح الغلاف الجوي عند طول الموجة 290 nm تقريباً عالي الامتصاص، يكون الهواء شافاً تماماً (غير شفاف) في الأطوال الموجـــية الأقصر منه. يحمي ذلك البيئة من أضرار الأشعة فوق البنفسجية المشعّة من الشمس. إن *الأوزون* (جزئيات مُكوّنة من ثلاث ذرات أوكسجين) الموجود في أعلى الغلاف الجوي مسؤول بشكل رئيسي عن هذا التأثير. يُخمِّد تلوث الأوزون بشكل كبير UV، ويسود في المدن الكبيرة في أشهر الصيف.

يُعتبر الزجاج العادي عائقاً افتراضياً لأشعة UV، وبالتالي لا يمكن استخدام الكاميرات ذات العدسات الـــزجاجية لالتقاط صور في هذا الجزء من الطيف. بدلاً منها يُستخدم ثقب صغير، ويحد ذلك بشكل كبير مـــن كمية الطاقة المارة في الكاشف. بينما يبلغ قطر عدسة الكاميرا بضعة ميليمترات أو سنتميترات، يكون قطـــر الـــثقب الصغير أقل من ميليمتر. يوجد نوع آخر من الأجهزة المستخدمة لتحسس UV وقياس شدها في الأطـــوال الموجية المختلفة وهو *مقياس الطيف الضوئي*. يُستخدم حاجز مشبك ناثر لتشتيت الطاقة الكهرطيسية إلى أطـــوالها الموجية المُكوَّنة من IR عبر الضوء المرئي إلى مجال الأشعة UV. بتحريك جهاز الحساسية جيئةً وذهاباً، يمكنك أن تخصَّ أي طول موجي بهدف التحليل. يوضح الشكل (18-5) مبدأ عمل مقياس الطيف الـــضوئي. تُستخدم في بعض الأحيان عدادات إشعاعية، مشابهة للأجهزة الموظفة لتحسس أشعة x أو أشعة غاما وذلك للأطوال الموجية القصيرة للغاية والواقعة في نهاية طيف UV (UV *القاسية*). لأغراض تصويرية، ســـيعمل فـــيلم الكاميرا العادية على أطوال أمواج UV طويلة (UV *اللّينة*). من الضروري استخدام فيلم خاص، يشبه إلى حدّ ما فيلم أشعة x، لإنشاء صور UV قاسية.



الشكل (18-5): المخطط الوظيفي لمقياس الطيف الضوئي، والذي يمكن استخدامه لتحسس وقياس الإشعاع الكهرطيسي للأطوال الموجية في *IR*، والمرئي، و*UV*.

تملك أشعة UV خاصة هامة يمكن ملاحظتها باستخدام ما يسمى الضوء الأسود. تبيع معظم حوانيت الهواة مصابيح من هذا النوع. إنها اسطوانية الشكل، ويمكن ظاهريا الخلط بينها وبين أنابيب الفلوريسنت الصغيرة. (لا تُعتبر مصابيح الضوء الأسود المتوهجة التي تُباع في المتاجر الكبيرة مُزوِّدات جيدة خاصة لأشعة UV). عند تعرضها لأشعة UV، تتوهج مواد معينة بسطوع في المجال المرئي. يعرف ذلك *بالفلورسنس*. تبيع المخازن الفنية لوحات أكريليكية (نسيج صناعي) مفصلة خصيصاً للتألق بألوان متنوعة عند ارتطام أشعة UV بها. يمكن أن يكون التأثير في غرفة مظلمة لافتاً للنظر. يتألق الفوسفور الذي يغطي CRT أيضاً عند تعرضه إلى UV. يحدث ذلك مع كائنات حية معينة كالعقارب. إذا كنت تعيش في الصحراء، اذهب خارجاً في ليلة ما مع مصباح ذي ضوء أسود وشغِّله. فإذا وُجد عقارب في الجوار فإنك ستجدها.

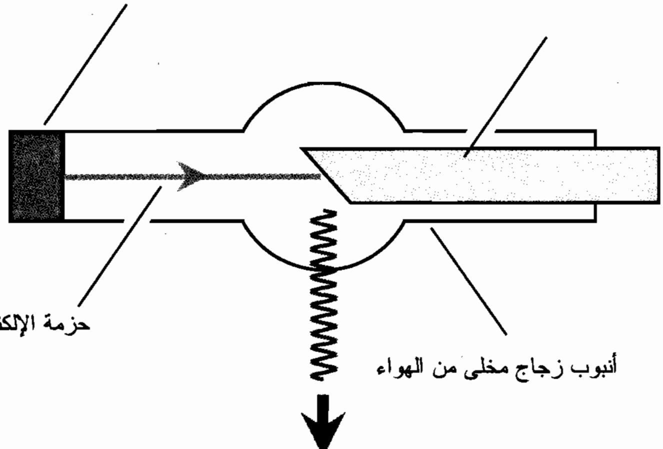
يقع معظم الإشعاع الذي تُشعه الشمس في طيف IR والطيف المرئي. لو كانت الشمس نجماً أكثر سخونة، وكانت تُنتج طاقة أكبر مما تُنتجه الآن في مجال UV، فإن نظام الحياة على أي كوكب مشابه للأرض كان سيتطور بطريقة مختلفة، إذا وجدت. يمكن أن يسبب التعرض الزائد عن الحد لأشعة UV، حتى لو كان بكميات صغيرة نسبياً والتي تصل لسطح الأرض في الأيام المشمسة، سرطان جلد وماء أزرق في العين عبر الزمن. يوجد دليل يشير إلى أن التعرض الزائد لأشعة UV يُخمِّد نشاط نظام المناعة، ويظهر على الإنسان والحيوانات الأكثر حساسية للأمراض المعدية. يعتقد بعض العلماء أن ثقب الأوزون الموجود في أعلى الغلاف الجوي، والموجود في نصف الكرة الجنوبي، يكبر بسبب تزايد الإنتاج وإصدار مُركّبات كيميائية معينة من قبل الجنس البشري. إذا كانت الحالة كذلك، وإذا ساءت المشكلة، يجب أن نتوقع تأثر ارتقاء الحياة على الكوكب.

أشعة x

يتكون طيف أشعة x من طاقة كهرطيسية بأطوال موجية تتراوح بين 1 nm تقريباً و0.01 nm. (لا تتفق المراجع المختلفة على الخط الفاصل بين مناطق UV القاسية وأشعة x). تناسبياً، فإن طيف أشعة x أكبر مقارنة مع طيف المجال المرئي.

اكتُشفت أشعة x مصادفة في عام 1895 من قبل الفيزيائي ويليام روتنجن أثناء تجارب استلزمت تمرير تيارات كهربائية في الغازات تحت ضغط منخفض. إذا كان التيار شديداً بشكل كاف، ستُنتج الإلكترونات عالية السرعة إشعاعاً غامضاً عند ارتطامها بالمصعد (المسرى المشحون بشحنة موجبة) الأنبوب. دُعيت الأشعة بأشعة x بسبب سلوكها، قبل مشاهدتها. كانت الأشعة قادرة على اختراق عوائق معيقة للضوء المرئي ومعيقة لأشعة UV. حدث وأن وُجد جسم مطلي بالفوسفور في جوار الأنبوب الحاوي على الغاز، ولاحظ روتنجن تألق الفوسفور. أظهرت التجارب اللاحقة قدرة الأشعة الكبيرة على الاختراق بحيث تمر عبر جلد وعضلات يد الإنسان، لتُلقي ظلالاً للعظام الموضوعة على سطح مغطى بالفوسفور. يمكن وضع فيلم تصوير بالطريقة نفسها.

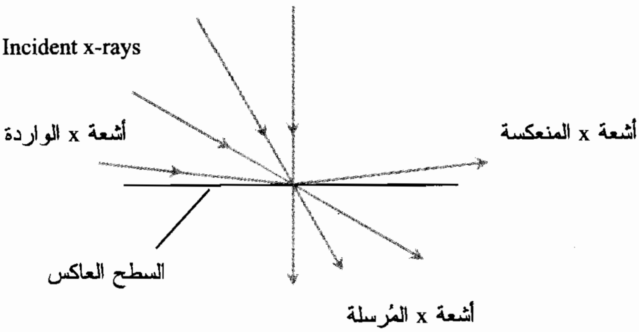
تعمل أنابيب أشعة x الحديثة عبر تسريع الإلكترونات إلى سرعة عالية، ثم إجبارها على الارتطام بمصعد مصنوع من معدن ثقيل (يُصنع عادةً من التنغستن). يوضح الشكل (18-6) مخططاً وظيفياً مبسطاً لأنبوب أشعة x من النوع الذي يستخدمه أطباء الأسنان لإيجاد النخر في أسنانك.



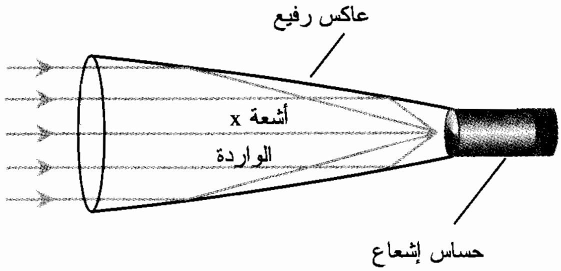
الشكل (18-6): مخطط عملي لأنبوب أشعة *x*.

عندما تصبح الأطوال الموجية لأشعة x أقصر وأقصر؛ تزداد صعوبة توجيهها وتركيزها. يعود ذلك لقوة اختراق الأشعة ذات الطول الموجي القصير. تعمل قطعة من الورق مع ثقب صغير بشكل جيد جداً في تصوير UV؛ أما أشعة x فهي تمر عبر الورقة. حتى ورق الألمنيوم فإنه يُعتبر شفافاً نسبياً بالنسبة لأشعة x.

إذا حطت أشعة x على سطح عاكس بزاوية مماسية تقريباً، وإذا كان السطح العاكس مصنوعاً من مادة مناسبة، يمكن تحقيق بعض درجات التركيز. كلما قصر طول موجة أشعة x، يجب أن تكون زاوية الورود أصغر، مقاسة بالنسبة للسطح (وليس بالنسبة للناظم). إذا أردنا أن تنعكس أمواج أشعة x القصيرة، يجب أن تكون الزاوية أصغر من 1° قوسية. يوضح الشكل (18-7-أ) تأثير الانعكاس المماسي. يوضح القسم (ب) من الشكل (18-7) التركيز الذي يُنجزه جهاز مراقبة أشعة x العالي-الدقة بشكل تقريبي. تكون مرآة التركيز رفيعة جداً وعلى شكل قطع مكافئ ممتد. بمجرد دخول أشعة x المتوازية فتحة العاكس فإنها ترتطم بالسطح الداخلي بزاوية مماسية. يجري إحضار أشعة x إلى نقطة محرقية، حيث يمكن وضع عداد إشعاع أو كاشف.



(أ)



(ب)

الشكل (18-7): (أ) انعكاس أشعة x عن السطح عند ارتطامها به بزاوية مماسية فقط.
(ب) مخطط وظيفي لجهاز تركيز ومراقبة أشعة x.

تسبب أشعة x تأين النسيج الحي. إن هذا التأثير تراكمي ويمكن أن يؤدي إلى الإضرار بالخلايا خلال مدة تُقدر بالسنوات. وهذا هو سبب عمل التقنيين في عيادات الأطباء وعيادات أطباء الأسنان خلف حاجز مُبطّن بالرصاص. وإلا سيتعرض هؤلاء الأشخاص إلى تراكم جرعات أشعة x. نحتاج افتراضياً إلى بضعة

ميليمترات من الرصاص فقط لحجب جميع أشعة x. تستطيع بعض المواد الصلبة وبعض المعادن الأقل كثافة أيضاً حجب أشعة x ولكن يجب أن تكون أكثر سماكة من بضعة ميليمترات. العامل الهام هو كمية المادة التي يجب مرور الإشعاع فيها. يمكن للانتقال الفيزيائي شبه العامودي أن يُخفِّض أيضاً شدة أشعة x، والتي تتلاشى مع مربع المسافة. ولكن، ليس عملياً بالنسبة لمعظم الأطباء وأطباء الأسنان العمل في عيادات كبيرة كفاية لاستخدام هذا البديل القابل للنجاح.

أشعة غاما (γ)

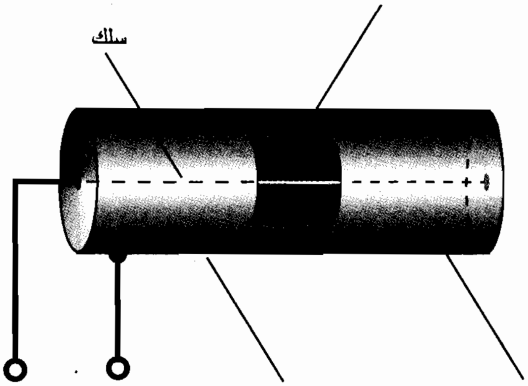
عندما يصبح طول موجة الأشعة الكهرطيسية أقصر وأقصر، تصبح قدرتها على الاختراق كبيرة حتى يصبح التركيز مستحيلاً. تقع نقطة القطع التي تنتهي عندها منطقة أشعة x وتبدأ عندها منطقة أشعة غاما عند طول الموجة 0.01 nm تقريباً (10^{-11} m). تستطيع أشعة غاما نظرياً أن تكون أقصر من هذه النهاية. يُمثِّل صنف غاما الحقل الأكثر طاقة بين الحقول الكهرطيسية كلها. تستطيع أشعة غاما قصيرة الموجة اختراق عدة سنتمترات من جسم مصنوع من الرصاص، أو أكثر من متر من الاسمنت. إنها أكثر ضرراً للأنسجة الحية من أشعة x. تأتي أشعة غاما من المواد ذات النشاط الإشعاعي، الطبيعية (مثل الرادون) والمواد الإشعاعية من صنع الإنسان (كالبلوتونيوم).

تُعتبر *العدادات الإشعاعية* الوسائل الرئيسية لكشف ومراقبة مُزوِّدات أشعة غاما. تستطيع أشعة غاما طرد الجُسيْمات من نوى الذرات التي تصطدم بها. يمكن كشف هذه الجُسيْمات الذرية الجزئية بواسطة العداد. يتكون أحد أنواع العدادات الإشعاعية من سلك رفيع مشدود ضمن أنبوب معدني اسطواني محكم الإغلاق ومملوء ببخار الكحول وغاز الأرغون. عند دخول جُسيْم ذري جزئي ذي سرعة عالية إلى الأنبوب، يتأين الغاز للحظة. يُطبَّق جهد بين السلك والأسطوانة الخارجية بحيث تحدث نبضة تيار كهربائي عند تأين الغاز. تُنتج نبضة كهذه طقة في خرج المضخم الموصول بالجهاز.

يوضح الشكل (18-8) مخططاً مبسطاً لعداد إشعاعي. يجري قطع نافذة زجاجية مع باب منزلق في الاسطوانة. يمكن فتح الباب للسماح للجُسيْمات ذات الطاقة المنخفضة بالدخول للداخل وإغلاقه للسماح فقط للجُسيْمات الأكثر طاقة بالدخول إلى الداخل. ليس للجُسيْمات الذرية عالية السرعة، ذات الوزن الصغير جداً بالنسبة لحجمها، مشكلة في اختراق زجاج النافذة إذا تحركت بسرعة كافية. عند إغلاق الباب تستطيع أشعة غاما الاختراق بسهولة.

الجُسيْمات الكونية

إذا كنت تجلس في غرفة لا يوجد فيها مواد ذات نشاط إشعاعي، وقمت بتشغيل العداد الإشعاعي ونافذة الأنبوب مغلقة، ستلاحظ طقة عرضية صادرة عن الجهاز. تأتي بعض الجُسيْمات من الأرض؛ توجد عناصر ذات نشاط إشعاعي في كل مكان تقريباً في الأرض (كميات صغيرة عادةً).



الشكل (18–8): مخطط مبسط لعداد إشعاعي.

يــأتي بعــض الإشعاع بشكل غير مباشر من الفضاء، ترتطم الجُسيْمات الكونية بالذرات في الغلاف الجوي، وهذه الذرات تقذف بدورها جُسيْمات ذرية جزئية أخرى تصل إلى أنبوب العداد.

لاحظ الفيزيائيون في بدايات القرن العشرين بوضوح ورود الإشعاع من الفضاء. لاحظوا زيادة شدة الإشــعاع الأرضــي الغريب عندما جرت عمليات المراقبة على ارتفاعات عالية؛ تناقص مستوى الإشعاع عــندما جــرت عمليات المراقبة تحت الأرض أو تحت الماء. يُدعى الإشعاع الفضائي هذا *بالإشعاع الكوني الــثاني أو الجُــسيْمات الكونــية الثانية*. تدعى الجُسيْمات الفعلية القادمة من الفضاء *بالجُسيْمات الكونية الرئيــسية*، وهي لا تخترق عادةً الغلاف الجوي بشكل كبير قبل اصطدامها وتجزئتها لنوى الذرات. لمراقبة الجُسيْمات الكونية الرئيسية، من الضروري الصعود لارتفاعات عالية، وكما في تحقيقات UV وأشعة x، لم يكن ذلك ممكناً حتى مجيء الصاروخ الفضائي.

بينما تتكون أشعة الطيف الكهرطيسي - المُكوَّن من الأمواج الراديوية، وIR، والضوء المرئي، وUV، وأشــعة x، وأشعة غاما- من فوتونات تتحرك بسرعة الضوء، تتكون الجُسيْمات الكونية الرئيسية من مــادة تنــتقل بسرعة الضوء تقريباً ولكن ليس تماماً. في سرعات عالية كهذه، تكتسب البروتونات، والنيتــرونات، والجُسيْمات الثقيلة الأخرى كتلة بسبب التأثيرات النسبية، ويظهرها ذلك منيعة تقريباً تجاه الحقل المغنطيسي الكروي للأرض. تصلنا هذه الجُسيْمات التي ترد للغلاف الجوي العلوي بمسارات مــستقيمة تماماً تقريباً على الرغم من وجود الحقل المغنطيسي لكوكبنا. يمكن عبر المراقبة الدقيقة لوابل الجُــسيْمات في جهاز يدعى حجرة الغيمة على متن سفينة فضاء تتحرك في مدار منخفض التحقق من اتجــاه قــدومها. يمكن عبر الزمن توليد خرائط سماوية للجُسيْمات الكونية ومقارنتها بخرائط لأطوال الأمواج الكهرطيسية المختلفة.

مسألة (18-4)

ما هي الطاقة المحتواة في كل فوتون في وابل من أشعة غاما طول موجتها 0.00100 nm؟

حل (18-4)

تذكر من الفصل السابع عشر صيغة الطاقة بدلالة طول الموجة λ، وسرعة انتشار الموجة الكهرطيسية في الفضاء الحر c، وثابت بلانك h:

$$e = hc/\lambda$$

بالنسبة للأشعة الكهرطيسية في الفضاء الحر، يساوي حاصل الضرب hc تقريباً 1.9865×10^{-25}. (يمكنك العودة إلى الفصل السابع عشر إذا كنت قد نسيت كيف جرى اشتقاقها). إن طول الموجة 0.00100 nm يكافئ 1.00×10^{-12} m. لذلك، تكون الطاقة، المحتواة في كل فوتون من أشعة غاما مقدرة بالجول

$$e = (1.9865 \times 10^{-25})/(1.00 \times 10^{-12})$$
$$= 1.99 \times 10^{-13}\ \text{J}$$

النشاط الإشعاعي

إن نوى معظم المواد المألوفة مستقرة. إنها تحتفظ بهوياتها ولا تتغيّر أبداً. ولكن، تتغيّر نوى بعض الذرات مع الزمن؛ فهي غير مستقرة. تتحل نوى الذرات غير المستقرة، وتصدر فوتونات عالية الطاقة وتصدر جُسيْمات ذرية جزئية متنوعة. *النشاط الإشعاعي* هو مصطلح عام يشير إلى أي نوع من أنواع الإشعاع هذه التي تظهر من تحلل الذرات المستقرة.

الأشكال

يدعى النشاط الإشعاعي أيضاً *بالإشعاع المؤيِّن* لأنه يستطيع نزع الإلكترونات من الذرات، ويحدث بأشكال مختلفة. الأشعة الأكثر شيوعاً هي أشعة غاما (والتي ناقشناها سابقاً)، و*جُسيْمات ألفا* (α). و*جُسيْمات بيتا* (β)، و*النيترونات*. يوجد أيضاً أشكال أقل شيوعاً كالبروتونات المضادة والبروتونات عالية السرعة، والنيترونات والنيترونات المضادة، ونوى الذرات الأثقل من الهيليوم.

تنتقل جُسيْمات ألفا وهي نوى الهيليوم 4- (^4He) بسرعات عالية. تتكون نواة ^4He من بروتونين ونيترونين. يمتلك جُسيْم ألفا شحنة كهربائية موجبة لعدم وجود إلكترونات مشحونة بشحنة سالبة تحيط به. إن جُسيْمات ألفا هي أيونات. تمتلك جُسيْمات ألفا كتلة كبيرة، وبالتالي إذا تحركت بسرعات عالية بشكل كاف، فإنها تستطيع اكتساب طاقة حركية ضخمة. ينتقل جُسيْم ألفا بسرعة تبلغ جزءاً كبيراً من سرعة الضوء (يُعرف *بالسرعة النسبية*) ويكتسب كتلة متزايدة نتيجة التأثيرات النسبية؛ التي تقدم له قدرة حركية كبيرة. ستتعلم عن زيادة الكتلة النسبية والتأثيرات الأخرى في الفصل عشرين. يمكن حجب معظم جُسيْمات ألفا بواسطة حواجز متواضعة.

إن جُسيْمات بيتا هي عبارة عن بوزيترونات أو إلكترونات عالية السرعة. (تذكر أن البوزتيرون هو المادة المضادة المتممة للإلكترون). يُشار لأي جُسيْم بيتا يتكون من إلكترون، والذي يدعى أيضاً *بالنيغاترون* لأنه يمتلك شحنة كهربائية سالبة، يُشار له بالرمز β^-، ويُشار لجُسيْم β الذي يتكون من بوزيترون، والذي يحمل شحنة موجبة، يشار له بالرمز β^+. تمتلك جميع جُسيْمات بيتا *كتلة متبقية* غير صفرية (كتلتها عندما لا تتحرك بالسرعة النسبية). تتزايد الطاقة الحركية لجُسيْمات بيتا نتيجة التأثيرات النسبية إذا تحركت بسرعات قريبة من سرعة الضوء.

النيترونات هي نوع مختلف كلياً من الجُسيْمات. لا تمتلك النيترونات أي شحنة كهربائية أو كتلة متبقية. تمتلك النيترونات قدرة اختراق هائلة. تُقذف الأرض باستمرار بالنيترونات من الفضاء. إن أصل هذه النيترونات هو مركز الشمس والنجوم البعيدة. تخترق معظم النيترونات الكوكب بكامله دون أن تتأثر. نحتاج لمعدات معقدة لكشفها. توضع كواشف النيترونات عميقاً تحت الأرض لحجب جميع أشكال الإشعاع الأخرى بحيث يكون العلماء متأكدين من أن المعدات تكشف حقيقة النيترونات، ولا تكشف جُسيْمات ضالة من نوع آخر. يوجد للنترينو نظير يُعرف *بالنترينو المضاد*.

المُزوِّدات الطبيعية

ينتج النشاط الإشعاعي في الطبيعة بواسطة نظائر لعناصر معينة ذات أعداد ذرية أكبر من 92 بما فيها 92 (يورانيوم). وتُعرف *بالنظائر ذات النشاط الإشعاعي*. يمتلك نظير الكربون، والمعروف بالكربون - 14 (^{14}C) ثمانية نيترونات. إن ذرات ^{14}C غير مستقرة؛ وهي تتحلل بمرور الزمن إلى ذرات الكربون-12 (^{12}C)، والتي تمتلك ستة إلكترونات. تتضمن الأمثلة الأخرى للذرات غير المستقرة الهيدروجين-3 (^{3}H) ، والذي يُعرف *بالتريتيوم* والذي تحوي نواته بروتوناً واحداً ونيترونيْن؛ والبيريليوم — 7 (^{7}Be)، والذي تحتوي نواته أربعة بروتونات وثلاثة نيترونات؛ والبيريليوم ^{10}Be والذي تحوي نواته أربعة بروتونات وستة نيترونات.

يمكن في بعض الحالات، أن يكون النظير الأكثر شيوعاً للعنصر الموجود طبيعياً، ذا نشاط إشعاعي أيضاً. والأمثلة هي الرادون، والراديوم، واليورانيوم. يمكن اعتبار وابل الجُسيْمات الكونية الواردة من الفضاء العميق شكلاً من أشكال النشاط الإشعاعي، ولكن تستطيع هذه الجُسيْمات في بعض الأحيان أن تنشئ نظائر لها عند ارتطامها بذرات مستقرة في أعلى الغلاف الجوي للأرض.

المُزوِّدات من صنع الإنسان

ينتج النشاط الإشعاعي عن الأنشطة البشرية المختلفة. كان النشاط الأكثر شهرة في السنوات الأولى للأبحاث الذرية هو *القنبلة الانشطارية*. وسليلها الحديث *القنبلة الاندماجية الهيدروجينية* الأكثر قوة. يحصل انفجار شديد ومباشر لإشعاع التأين عند تفجير سلاح كهذا. تصبح كميات كبيرة من المادة مشعّةً بفعل الجُسيْمات الذرية الجزئية الناتجة عن الانفجار الأولي، خاصة إذا حدث الانفجار على سطح الأرض أو بالقرب منه. يُدعى الغبار المشعّ الناتج *بالغبار الذري*، والذي يتساقط على الأرض بعد فترة من الزمن.

يستطيع بعض الغبار الذري، الناتج عن القنابل الذرية الكبيرة بشكل خاص، الارتفاع لأعلى طبقة التروبوسفير ودخول جيت ستريم، والذي ينقله حول الكوكب.

تحتوي *المفاعلات النووية الانشطارية* على عناصر مشعّة. تُستخدم الحرارة الناتجة عن انحلال عناصر كهذه لتوليد القدرة الكهربائية. تكون بعض نواتج الانشطار مشعّة، وبسبب عدم إمكانية إعادة استخدامها لتوليد المزيد من القدرة، فهي تشكل *نفايات مشعة*. يُعتبر التخلص من هذه النفايات مشكلة لأن تحللها يتطلب سنين عديدة، وحتى قرون. إذا تم تطوير *مفاعل اندماجي* وتم وضعه في الخدمة، فإن ذلك سيُمثّل تحسناً هائلاً مقارنة بالمفاعل الانشطاري لأن اندماج الهيدروجين المُتحكّم به لا يُنتج أي نفايات مشعّة.

يمكن إنتاج النظائر المشعّة بقذف ذرات عناصر معينة بجُسيْمات ذرية جزئية عالية السرعة أو بقذفها بأشعة غاما النشطة. يجري تسريع الجُسيْمات المشحونة إلى سرعات نسبية بواسطة *مُسرِّعات الجُسيْمات*. إنّ *المُسرِّع الخطي للجُسيْمات* هو عبارة عن أنبوب طويل مُخلى من الهواء ويُطبّق عليه جهد عالٍ لتسريع الجُسيْمات كالبروتونات، وجُسيْمات ألفا، والإلكترونات، إلى سرعات كبيرة جداً بحيث تستطيعُ تغيير أو فلق نوى ذرية معينة عند اصطدامها بها. السيكلوترون هو حجرة كبيرة على شكل حلقة يستخدم الحقول المغنطيسية المتناوبة لتسريع الجُسيْمات إلى سرعات نسبية.

الانحلال ونصف العمر

تفقد المواد المشعّة "تأثيرها" تدريجياً بمرور الزمن. تتدهور النوى غير المستقرة الواحدة تلو الأخرى. تنحل النواة غير المستقرة في بعض الأحيان إلى نواة مستقرة بانتقال (حدث) واحد. في حالات أخرى، تنحل النواة غير المستقرة إلى نواة غير مستقرة أخرى، والتي تتحول لاحقاً إلى نواة مستقرة. افترض أن لديك عدداً كبيراً للغاية من النوى المشعّة، افترض أنك تقوم بقياس طول المدة الزمنية المطلوبة لكي تتدهور كل نواة، ثم قمت بحساب متوسط جميع النتائج. يدعى زمن التحلل الوسطي *بمتوسط العمر* ويُرمز له بالحرف الإغريقي الصغير (τ).

تنشر بعض المواد المشعّة أكثر من شكل للإصدار. لأي شكل شعاعي متأيّن (جُسيْمات ألفا أو جُسيْمات بيتا أو أشعة غاما أو غيرها) *منحنى تحلل منفصل* أو تابع للشدة بدلالة الزمن. إن شكل منحنى التحلل الإشعاعي مميز دائماً: إنه يبدأ بقيمة معينة وينحدر باتجاه الصفر. تتناقص بعض منحنيات الانحلال بسرعة، ويتناقص البعض الآخر ببطء، ولكن يكون الشكل المُميِّز دائماً نفسه ويمكن تحديده بدلالة الفترة الزمنية المعروفة *بنصف العمر*، ويرمز لها $t_{1/2}$.

افترض أنه جرى قياس شدة إشعاع نوع خاص في اللحظة الزمنية t_0. وبعد مرور مدة زمنية مقدارها $t_{1/2}$، تناقصت شدة ذلك الشكل من الإشعاع إلى نصف المستوى الذي كانت عليه في اللحظة t_0. بعد مرور نصف العمر مرة أخرى (الزمن الكلي المنقضي $2t_{1/2}$)، تنخفض الشدة إلى ربع القيمة الأصلية. وبعد مرور نصف العمر مرة أخرى (الزمن الكلي المنقضي $3t_{1/2}$)، تنخفض الشدة إلى ثمن القيمة الأصلية. وفي الحالة العامة، وبعد مرور n نصف عمر بدءاً من الزمن الابتدائي t_0 (الزمن الكلي المنقضي $nt_{1/2}$)، تنخفض الشدة إلى $1/(2^n)$ أو 0.5^n القيمة

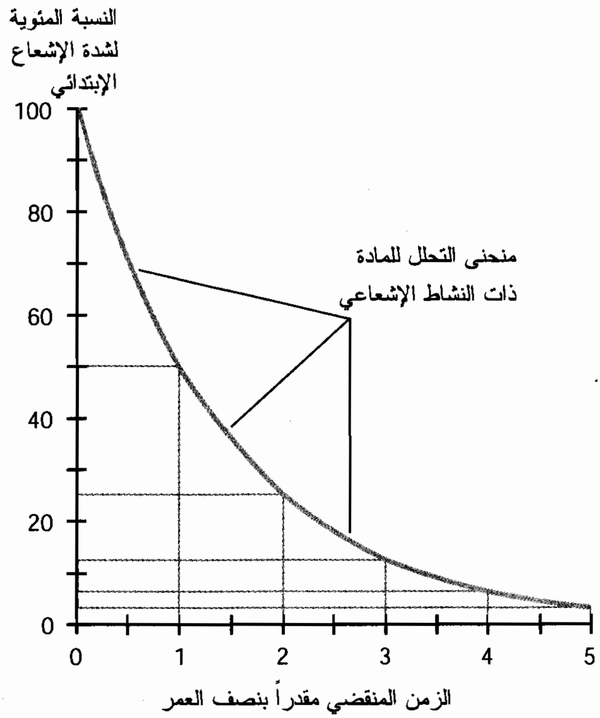
الأصلية. إذا كانت الشدة الأصلية x_0 وحدة وكانت الشدة النهائية x_f وحدة، بالتالي

$$x_f = 0.5^n x_0$$

يوضح الشكل (18–9) الشكل العام لمنحنى التحلل الإشعاعي. يمكن أن يتغيّر نصف العمر $t_{1/2}$ بدرجة هائلة اعتماداً على المادة الإشعاعية الخاصة المساهمة. يكون $t_{1/2}$ في بعض الأحيان جزءاً صغيراً من 1 ثانية؛ ويكون في حالات أخرى ملايين السنين. بالنسبة لكل نمط إشعاع تصدره المادة، توجد قيمة منفصلة $t_{1/2}$ وبالتالي منحنى تحلل منفصل.

توجد طريقة أخرى لتحديد التحلل الإشعاعي وهي بدلالة عدد يدعى *ثابت التحلل* ويُرمز له بالحرف الإغريقي الصغير لامدا (λ). يساوي ثابت التحلل إلى اللوغاريتم الطبيعي للعدد 2 (0.69315 تقريباً) مقسوماً على نصف العمر مقدراً بالثواني. يُعبّر عن ذلك كما يلي:

$$\lambda = 0.69315/t_{1/2}$$



الشكل (18–9): الشكل العام لمنحنى التحلل الإشعاعي.

حدث وأن كان رمز ثابت التحلل الإشعاعي هو رمز طول الموجة الكهرطيسية نفسه. لا تخلط بينهما؛ فهما كميتان مستقلتان ومختلفتان كلياً. تأكد أيضاً عند تحديد ثابت التحلل من أنه يُعبّر عن $t_{1/2}$ بالثواني. وسيؤكد ذلك من أنه يجري التعبير عن ثابت التحلل بوحدات مناسبة (s^{-1}). إذا بدأت مع $t_{1/2}$ مُعبّراً عنه بوحدات غير الثواني، ستحصل على ثابت تحلل خاطئ لأنه جرى التعبير عنه بشكل غير مناسب.

إن ثابت التحلل هو مقلوب متوسط الحياة بالثواني، لذلك يمكن ذكر هذه المعادلات:

$$\lambda = 1/\tau \quad و \quad \tau = 1/\lambda$$

نستطيع أن نرى من هذه المعادلات ارتباط متوسط العمر τ بنصف العمر $t_{1/2}$ على الشكل التالي:

$$\tau = t_{1/2}/0.69315$$
$$= 1.4427\, t_{1/2}$$

و

$$t_{1/2} = 0.69315\, \tau$$

الوحدات والتأثيرات

تُوظّف عدة وحدات مختلفة لتحديد التعرض الكلي للإشعاع. إن وحدة الإشعاع في النظام الدولي للوحدات هي بيكريل (Bq). وتُمثّل انتقالاً نووياً واحداً بالثانية ($1s^{-1}$). يُقاس التعرض للإشعاع وفقاً للكمية الضرورية لإنتاج كولون من الشحنة الكهربائية، على شكل أيونات، في كيلو غرام من الهواء النقي الجاف. إن الوحدة الدولية لهذه الكمية هي *كولون بالكيلو غرام* (C/kg). توجد وحدة أقدم، تُعرف *بالروتنجن* (R) وتكافئ 2.58×10^{-4} C/kg.

عند تعرض مادة كالنسيج البشري للإشعاع، فإن *الوحدة القياسية للجرعة المكافئة هي سيغرت* (Sv)، وتكافئ 1 جول بالكيلوغرام (1J/kg). ستسمع في بعض الأحيان عن وحدة *rem* (وهي كلمة مؤلفة من أوائل حروف مجموعة الكلمات (an acronym for roentgen equivalent man)؛ 1 rem = 0.01 Sv.

تُشوش جميع هذه الوحدات على الحديث عن الكمية الإشعاعية. ولزيادة الأمور سوءاً، بقي استعمال بعض الوحدات كالروتنجن وrem ملغياً تقنياً، خاصة في حديث العامة عن الإشعاع، بينما اكتسبت الوحدات القياسية القبول بشكل قليل. هل قرأت أن "تعرّض الإنسان لأكثر من 100 روتنجن من الإشعاع المؤين خلال بضع ساعات سيجعل الإنسان مريضاً" أو أنه "بتعرض الناس عادةً إلى بضع rem أثناء حياتهم"؟ إن عبارات كهذه شائعة في مستندات الدفاع المدني في ستينيات القرن العشرين بعد أزمة الصواريخ الكوبية، عندما قاد الخوف من اندلاع حرب نووية عالمية إلى تثبيت صفارات إنذار ضد الغارات الجوية وبناء ملاجئ للحماية من الغبار الذري في الولايات المتحدة بكاملها.

عند تعرض البشر لكميات مفرطة من الإشعاع في زمن قصير، فإنهم يصابون بأعراض فيزيائية كالغثيان، وحروق في الجلد، والإعياء، والجفاف. يؤدي ذلك التعرض في الحالات القصوى إلى تقرحات وإلى نزيف داخلي يؤدي للموت. عند تعرض البشر لإشعاعات كبيرة جداً تدريجياً خلال فترة تمتد لسنوات، تزداد معدلات السرطان، وتحدث طفرات جينية أيضاً، تؤدي لزيادة نسبة حدوث ولادات مشوهة.

الاستخدامات العملية

للنـــشاط الإشعاعي تطبيقات بناءة هائلة في العلم، والصناعة، والطب. يُعتبر مفاعل الانشطار النووي التطبـــيق الأكثـــر شهرة، والذي شاع في منتصف القرن العشرين وحتى نهايته لتوليد الكهرباء على نطاق واسع. لم يعد هذا النوع من مصانع القدرة مرغوباً بسبب النفايات الخطرة للمنتجات التي ينتجها.

تُـــستخدم النظائر المشعّة في الطب لمساعدة الأطباء في تشخيص المرض، وإيجاد الأورام داخل الجسم، وقياس معدلات الأيض، وفحص بنية الأعضاء الداخلية. تُستخدم جرعات مُتحكّم بها من الإشعاع في بعض الأحيان في محاولة لتدمير النمو السرطاني. يمكن استخدام الإشعاع في الصناعة لقياس أبعاد الصفائح المعدنية أو البلاســتيكية الرقيقة، أو لقتل الباكتيريا والفيروسات التي قد تلوث الأغذية والمواد الاستهلاكية أو المواد التي يتعامل بها البشر، ومن أجل تصوير الأمتعة على الخطوط الجوية بأشعة -x. تتضمن التطبيقات الأخرى تشعيع الأغذية، والشحن، والبريد لحماية العموم من خطر هجوم بيولوجي.

يستخدم علماء الأحياء والجيولوجيون *التاريخ الإشعاعي* لتقدير أعمار عيّنات المستحثات والنواتج الصنعية الأثـــرية. يـــشكل الكربون العنصر الأكثر استخداماً في هذه العملية. عند أخذ عيّنة أو عندما تكون العيّنة حية، يُعتقد بوجود نسبة معينة من ذرات ^{14}C بين ذرات الكربون الكلية. تتحل هذه الذرات تدريجياً إلى ذرات ^{12}C. بقياس شدة الإشعاع وتحديد نسبة ^{14}C في العيّنات، يستطيع علماء علم الإنسان (الأنثروبولوجي) الحصول على فكـــرة عن ولادة الحضارات العالمية الكبيرة، وزمن ازدهارها، وزمن انحدارها. استخدم علماء المناخ هذه التقنية لاكتشاف أن الأرض قد مرت بدورات تبريد وتسخين كونية معممة.

كـــشف التاريخ الإشعاعي أن الدنياصورات قد اختفت فجأة وبشكل كلي تقريباً خلال مدة قصيرة من الزمن منذ حوالى 65 مليون سنة. جرى بواسطة إجرائية الحذف، تحديد أنه قد سقط مُذنّب أو كويكب ضـــخم في خليج المكسيك في ذلك الوقت. وقد أصبح مناخ الأرض بارداً لسنين بسبب دخول الحطام إلى الغـــلاف الجوي مما أدى لحجب الكثير من أشعة IR الشمسية التي تصل بشكل طبيعي إلى سطح الأرض. وضحت الدراسات الإضافية التي أُجريت على الشهُب المتفجرة حصول تأثيرات جوهرية في الماضي البعيد، عـــدّل كل منها وبشكل جذري مجرى الحياة على الأرض. اتفق معظم العلماء اعتماداً على هذه المعرفة أن المـــسألة قضية وقت قبل حدوث حدث مشابه. عند -ليس إذا- حدوثه، ستكون تبعاته على البشرية ذات أبعاد كارثية.

مسألة (5-18)

افترض أن نصف عمر مادة مشعّة معينة 100 سنة. قست شدة الإشعاع ووجدت أنه x_0 وحدة. ما هي الشدة x_{365} بعد مرور 365 يوماً.

حل (5-18)

لتحديد ذلك، استخدم المعادلة المحددة سابقاً:

$$x_{365} = 0.5^n x_0$$

حيث إنّ n عدد أنصاف العمر المنقضية. وفي هذه الحالة $n = 365/100 = 3.65$. وبالتالي

$$x_{365} = 0.5^{3.65}\, x_0$$

لتحديد القيمة $0.5^{3.65}$ استخدم آلة حاسبة بتابع x^y. يقود ذلك إلى النتيجة التالية بثلاثة أرقام هامة:

$$x_{365} = 0.0797\, x_0$$

مسألة (18-6)

ما هو ثابت انحلال المادة الموصوفة في المسألة (18-5)؟

حل (18-6)

استخدم الصيغة السابقة لثابت الانحلال λ بدلالة نصف العمر $t_{1/2}$. في هذه الحالة، $t_{1/2}$ يساوي 100 يوم. يجب تحويل ذلك إلى ثوان للحصول على نتيجة صحيحة لثابت الانحلال. يوجد $24 \times 60 \times 60 = 8.64 \times 10^4$ s في اليوم. وبالتالي $t_{1/2} = 8.64 \times 10^6$ s،

$$\lambda = 0.69315/(8.64 \times 10^6)$$
$$= 8.02 \times 10^{-8}\ \text{s}^{-1}$$

مسألة (18-7)

ما هو متوسط عمر المادة المشروحة في المسألة (18-5)؟ عبر عن الجواب بالثواني والأيام.

حل (18-7)

إن متوسط العمر τ هو مقلوب ثابت الانحلال. للحصول على τ بالثواني، قسِّم الأعداد في المعادلة السابقة مع التبديل بين بسط ومقام الكسر (الصورة والمخرج):

$$\tau = (8.64 \times 10^6)/0.69315$$
$$= 1.25 \times 10^7$$

حيث جرى التعبير عن الجواب بالثواني. للتعبير عن الجواب بالأيام، قسِّم على 8.64×10^4. وذلك يعطي جواباً مساوياً 145 يوماً تقريباً.

امتحان موجز

عـد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. يقال عن مُرسل أنه يعمل بحزمة 15-m. ما هو التردد الموافق لطول الموجة 15 m؟

(a) 20 Hz

(b) 20 kHz

(c) 20 MHz

(d) 20 GHz

2. يكون حاجز رصاصي سميك شفافاً بشكل كامل تقريباً بالنسبة إلى

(a) الأشعة UV.

(b) جُسيْمات بيتا.

(c) جُسيْمات ألفا.

(d) النيترونات.

3. تكون أكثر الحقول الكهرطيسية طاقة على شكل (بدلالة الطاقة في كل فوتون)

(a) جُسيْمات ألفا.

(b) أشعة ELF.

(c) rf.

(d) أشعة غاما.

4. بهدف إنتاج حقل كهرطيسي، يجب أن تكون حوامل الشحنة

(a) في حالة حركة.

(b) متسارعة.

(c) عامودية على خطوط التدفق الكهربائي.

(d) عامودية على خطوط التدفق المغنطيسي.

5. تفقد عيِّنة إشعاعية معينة سبعة أثمان شدة إشعاعها تماما بعد 240 سنة. ما هو نصف عمر هذه المادة؟

(a) 30 سنة.

(b) 80 سنة.

(c) 160 سنة.

(d) 210 سنوات.

6. لا تستطيع الأمواج الراديوية متوسطة التردد الناشئة في الفضاء بلوغ سطح الأرض لأنه

(a) يطغى عليها الضجيج الكهرطيسي الناتج عن الشمس.

(b) تحرفها الريح الشمسية عن الأرض.

(c) يحبسها الحقل المغنطيسي الشمسي في مدار شمسي.

(d) لا تستطيع اختراق أيونسفير الأرض.

7. عندما تنتقل الأمواج الراديوية لمسافات طويلة بسبب انحباسها بين طبقات الهواء ذات درجات الحرارة المختلفة، يُدعى هذا الانتشار

(a) بالموجة الأرضية.

(b) بالموجة السطحية.

(c) بالمجرى.

(d) E- المتشتت.

8. يحدث تأثير البيت الزجاجي في بيئة الأرض

(a) لأن الغــلاف الجوي شفاف تجاه IR في بعض أطوالها الموجية وشاف (غير شفاف) تجاه IR في أطوال موجية أخرى.

(b) عدم احتواء الغلاف الجوي على الأوكسجين الكافي لحجب أشعة IR الواردة من الشمس.

(c) يسمح اتساع ثقب الأوزون بمرور الأشعة IR أكثر وأكثر.

(d) انصهار المناطق القطبية الجليدية.

9. الحسنة الأساسية للمفاعل الاندماجي الهيدروجيني مقارنة بالمفاعل الانشطاري هو حقيقة أن

(a) المفاعل الاندماجي الهيدروجيني أبرد من المفاعل الانشطاري.

(b) بناء المفاعل الاندماجي الهيدروجيني أسهل من بناء المفاعل الانشطاري.

(c) لا يُنتج المفاعل الاندماجي نفايات مشعّة.

(d) يمكن استخدام المفاعل الاندماجي كقنبلة في حالة الطوارئ.

10. الطريقة الجيدة لحماية نفسك من حقول ELF هي

(a) ببناء حواجز سميكة مصنوعة من الإسمنت أو الرصاص.

(b) وضع المُزوِّد خلف فلتر للحماية من الانبهار.

(c) الابتعاد لمسافة معينة عن المُزوِّد.

(d) لا يوجد.

الفصل 19

البصريات

كانـــت عـــين الإنـــسان الأداة الوحـــيدة المتوفـــرة لمـــراقبة الظواهر المرئية حتى بضع مئات خلت مـــن الـــسنين. تغيّـــر ذلك بتطوير المجربين للتلسكوبات (المقراب) والميكروسكوبات (المجهر)، والأجهزة الأخرى.

سلوك الضوء

يـــسلك الضوء المرئي دائماً الطريق الأقصر بين نقطتين، ويتحرك دائماً بالسرعة نفسها. تبقى هاتان القاعـــدتان صـــحيحتين طالما بقي الضوء منتشراً في الخلاء. ولكن، إذا كان الوسط الذي ينتقل فيه الضوء مخـــتلفاً جـــداً عـــن الخـــلاء، وخاصة إذا تغيّر الوسط بمرور الشعاع الضوئي فيه، لا تُوظَّف عندها هاتان البديهيـــتان. إذا انتقل الشعاع الضوئي من الهواء إلى الزجاج أو من الزجاج إلى الهواء، مثلاً، يكون مسار الشعاع منحنياً. يُغيِّر الشعاع الضوئي أيضاً اتجاهه عند انعكاسه عن المرآة.

الأشعة الضوئية

يمكـــن أن ندعو النفق الرفيع من الضوء، كالنفق المار من الشمس إلى ثقب صغير في قطعة من الورق المقوى، *بالشعاع الضوئي أو الحزمة الضوئية*. بمعنى تقني أكثر، *الشعاع* هو المسار الذي يسلكه فوتون فردي (جُسيْم ضوئي) في الفضاء أو في الهواء أو في الزجاج أو في الماء أو في أي وسط آخر.

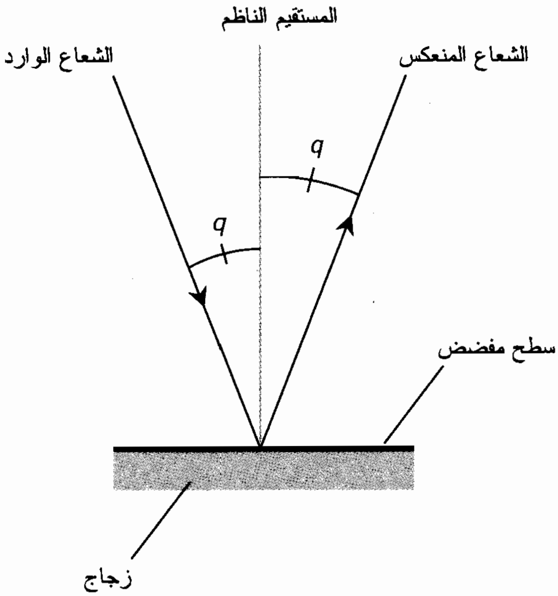
يمـــتلك الـــضوء خاصـــتين موجية وجسيْمية. تُعتبر هذه الثنائية ومنذ زمن بعيد موضوعاً هاماً بين الفيزيائيين. يُفسِّر النموذج الجُسيْمي في بعض الحالات، السلوك الضوئي بشكل جيد جداً، ويُقصِّر النموذج الموجي في تفسير ذلك، ويكون العكس صحيحاً في سيناريوهات أخرى. لم يرَ أحد فعلياً الشعاع الضوئي؛ كل ما نستطيع رؤيته هو تأثيراته الناتجة عند ارتطامه بشيء ما. ولكن، توجد أمور معيَّنة نستطيع أن نقولها عن كيفية تصرف الأشعة الضوئية. إن هذه الأمور معروفة مسبقاً كمياً ونوعياً.

الانعكاس

مـــن المـــؤكد أن إنسان ما قبل التاريخ قد عرف *الانعكاس*. لن يستغرق المخلوق الذكي وقتاً طويلاً ليكتـــشف أن "شـــبح البركة" كان فعلياً صورة مرئية له أو لها. يعكس أي سطح أملس لامع بعض الضوء المرتطم به، وبالتالي فإن أي شعاع يصطدم بسطح ما ينعكس عنه بعيدا بزاوية تساوي زاوية اصطدامه بها. ربما سمعت بالعبارة "*زاوية الورود تساوي زاوية الانعكاس*". يُعرف هذا المبدأ *بقانون الانعكاس* وهو موضح في الشكل (19−1).

في البـــصريات، تُقاس زاوية الورود وزاوية الانعكاس بالنسبة *للمستقيم الناظم* (يدعى أيضاً *بالمستقيم العامـــودي أو الـــناظم*). أشُير في الشكل (19−1) لهذه الزوايا بالحرف *q* ويمكن أن تتراوح بين 0^o عندما يرتطم الشعاع الضوئي بالسطح بزاوية عامودية، و90^o تقريباً، أي زاوية مماسية للسطح.

إذا لم يكن السطح العاكس مسطحاً بشكل كامل، يستمر تطبيق قانون الانعكاس لكل شعاع ضوئي يـــرتطم بالسطح في نقطة ارتطامه بالسطح. في حالة كهذه، يُعتبر الانعكاس بالنسبة للمستوى المسطح المار من النقطة والمماس للسطح في تلك النقطة. عندما ترتطم عدة أشعة ضوئية متوازية في نقاط مختلفة من سطح عـــاكس مـــنحنٍ غير منتظم، يخضع كل شعاع لقانون الانعكاس، ولكن لا تصدر جميع الأشعة المنعكسة بشكل متوازٍ. تتقارب هذه الأشعة في بعض الحالات؛ وتتباعد في حالات أخرى. وفي حالات أخرى تتناثر الأشعة عشوائياً.



الشكل (19−1): عند انعكاس الشعاع الضوئي عن سطح مسطح ولامع،
فإن زاوية الورود تساوي زاوية الانعكاس. أشير لكلتا الزاويتين هنا بالحرف *q*.

الانكسار

لاحـــظ البدائيون *الانكسار* كما لاحظوا الانعكاس؛ تبدو البركة الصافية أقل عمقاً مما هي عليه فعلياً نتيجة هذا التأثير. يقترن الانكسار بحقيقة انتشار الضوء بسرعات مختلفة في الأوساط المختلفة. لا يخرق ذلك المبدأ الأساسي في النظرية النسبية. إن سرعة الضوء مطلقة في الخلاء، حيث ينتقل الضوء بسرعة 229,792 km/s أو (186,282 mi/s)، ولكن ينتقل الضوء بسرعة أبطأ من السرعة المطلقة في الأوساط الأخرى.

تخـــتلف سرعة الضوء في الهواء بشكل طفيف عن سرعته في الخلاء، وعلى الرغم من ذلك يمكن أن يكـــون الاختلاف كبيراً بدرجة كافية لإحداث تأثيرات انكسارية في الزوايا القريبة من الزوايا المماسية عند مـــرور الضوء بين كتل الهواء ذات الكثافات المختلفة. ينتقل الضوء في الماء، والزجاج، والكوارتز، والماس، وفي الأوســـاط الـــشفافة الأخرى ببطء كبير جداً مقارنة بانتقاله في الخلاء. إن *القرينة الانكسارية للوسط*، وتدعى أيضاً *قرينة انكسار الوسط*، هي نسبة سرعة الضوء في الخلاء إلى سرعة الضوء في ذلك الوسط. إذا كانـــت c ســـرعة الضوء في الخلاء وc_m سرعة الضوء في الوسط M، بالتالي يمكن حساب قرينة انكسار الوسط M، ولندعُها r_m ببساطة

$$r_m = c/c_m$$

اســـتخدم دائماً الوحدات نفسها عند التعبير عن c وc_m. وفقاً لهذا التعريف، تكون قرينة الانكسار لأي وسط شفاف أكبر أو تساوي 1.

كلما ازدادت قرينة انكسار المادة الشفافة، كلما انحنى الضوء عند مروره على الحد الفاصل بين تلك المـــادة والهـــواء. تختلف قرائن الانكسار باختلاف نوع الزجاج. يكسر الكوارتز الضوء أكثر من الزجاج، ويكـــسر الماس الضوء أكثر من الكوارتز. إن قرينة الانكسار الكبيرة للماس مسؤولة عن تألق حجارة الماس بألوان متعددة.

مسألة (19−1)

تـــبلغ قـــرينة انكسار مادة شفافة معينة 1.50 بالنسبة للضوء الأصفر. ما هي السرعة التي ينتقل بها الضوء الأصفر في هذا الوسط؟

حل (19−1)

استخدم الصيغة السابقة "وعوِّض" قرينة الانكسار وسرعة الضوء في الخلاء. دعنا نُعبِّر عن السرعات بالكيلومتـــر بالثانية وقرب c إلى 3.00×10^5 km/s. وبالتالي يمكن إيجاد سرعة الضوء الأصفر في المادة الشفافة c_m على الشكل التالي:

$$1.50 = 3.00 \times 10^5/c_m$$

$$1.50c_m = 3.00 \times 10^5$$

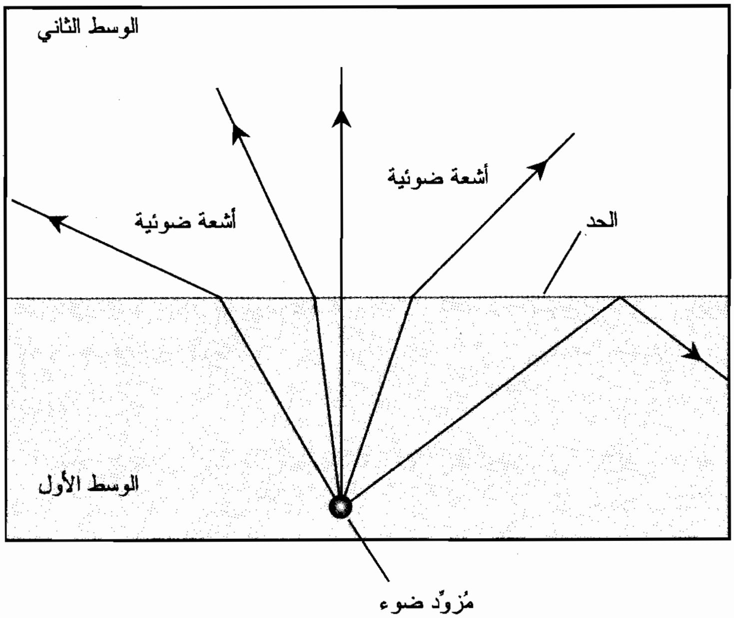
$$c_m = 3.00 \times 10^5/1.50 = 2.00 \times 10^5$$

الأشعة الضوئية على الحد الفاصل

يوضـــح الشكل (19-2) مثالاً نوعياً للانكسار، حيث إن قرينة انكسار الوسط الأول (الأدنى) أكبر من قرينة انكسار الوسط الثاني (الأعلى). الشعاع الذي يرتطم بالحد بزاوية قائمة (زاوية الورود تساوي 0^o) يمر دون أن يُغيِّـــر اتجاهـــه. ولكن ينحني الشعاع الذي يرد بزاوية أخرى؛ كلما ازدادت زاوية الورود، كلما كانـــت زاوية خروج الحزمة الضوئية الحادة أكبر. عندما تبلغ زاوية الورود *زاوية حرجة معينة*، لا ينكسر الشعاع الضوئي على الحد بل وبدلاً من ذلك ينعكس إلى الوسط الوارد منه ويُعرف ذلك *بالانعكاس الكلي الداخلي*.

الـــشعاع الناشئ في الوسط الثاني (العلوي) والذي يرتطم بالحد بزاوية مماسية ينحني للأسفل. يسبب ذلـــك تشوه الصور الطبيعية عند مشاهدتها من تحت الماء. لو كنت غواصاً يستخدم اسطوانة الأوكسجين المضغوط، لكنت رأيت هذا التأثير. يمكن مشاهدة السماء، والأشجار، والتلال، والأبنية، والناس وكل شيء آخر ضمن دائرة ضوئية تشوه المنظر كعدسات منفرجة الزاوية.

إذا لم يكـــن الـــسطح الكاسر مسطحاً، ستستمر بتطبيق المبدأ الموضح في الشكل (19-2) على كل شـــعاع ضـــوئي يرتطم بالحد في أي نقطة. نأخذ الانكسار بالاعتبار بالنسبة لمستوى مسطح مار بالنقطة وممـــاس للحد في تلك النقطة. عند ارتطام عدة أشعة ضوئية متوازية بحد انكساري غير منتظم أو منحنٍ في عدة نقاط مختلفة، يمتثل كل شعاع لمبدأ الانكسار كل شعاع على حدة.



الشكل (19-2): تنحني الأشعة الضوئية أكثر أو أقل عند عبورها للحد الفاصل بين الأوساط ذات الخصائص المختلفة.

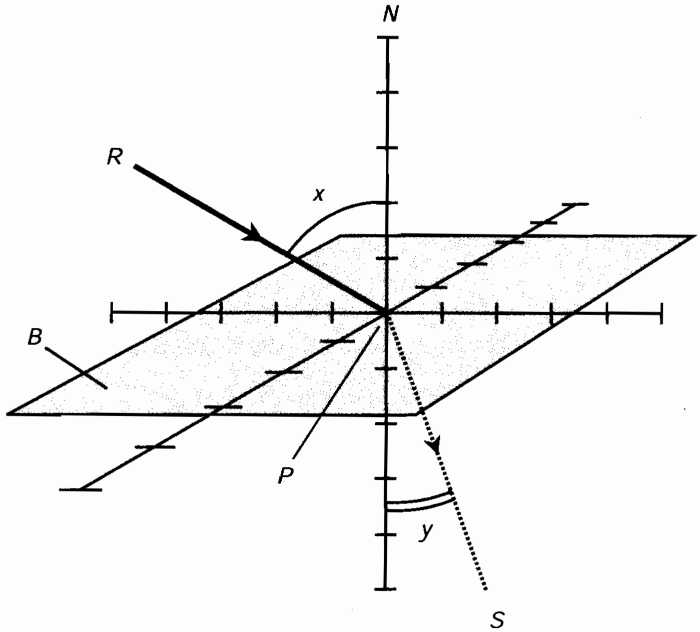
قانون سنل

يمكـــن تحديد مدى انحناء الشعاع الضوئي عند اصطدامه بالحد الفاصل بين مادتين لهما قرينتا انكسار مختلفة، وفقاً لمعادلة تسمى *قانون سنل*.

انظر للشكل (19-3). افترض أن B هو حدّ مسطح بين الوسطين M_r وM_s، وأن قرينتي انكسارهما r وs على التوالي. تخيل شعاعاً ضوئياً يعبر الحد كما هو موضح. ينحني الشعاع عن السطح إذا لم يرتطم به بزاوية قائمة، على افتراض أن قرينتي الانكسار r وs مختلفة.

افترض أن $s > r$؛ أي أن الضوء يمر من وسط ذي قرينة انكسار منخفضة نسبياً إلى وسط ذي قرينة انكسار مرتفعة نسبياً. ليكن N المستقيم المار في نقطة ما P تقع في المستوى B بحيث يكون N الناظم على B في النقطة P. افترض أن الشعاع الضوئي R ينتقل في الوسط M_r ويرتطم بالمستوى B في النقطة P. لتكن x الـــزاوية التي يشكلها الشعاع R مع الناظم N في المستوى P. وليكن S الشعاع الضوئي الذي يصدر من المـــستوى P إلى الوسط M_s. لتكن y الزاوية التي يشكلها الشعاع S مع الناظم N في المستوى P. وبالتالي يقـــع المـــستقيم N، والـــشعاع R، والشعاع S في المستوى نفسه، وتكون $x > y$. تكون الزاويتان x وy متساويتين فقط، وإذا فقط، كانت زاوية ورود الشعاع R مساوية $0°$. وبالتالي تكون هذه المعادلة صحيحة بالنسبة للزاويتين x وy في هذه الحالة:

$$\sin y/\sin x = r/s$$



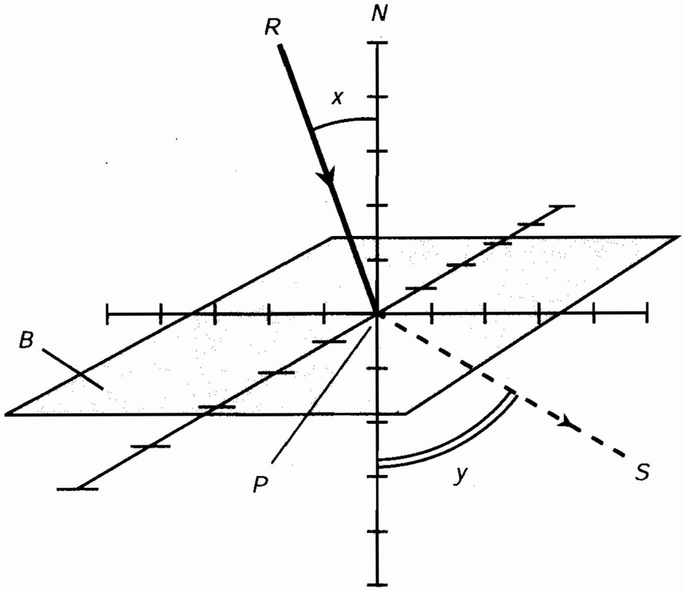
الشكل (19-3): شعاع مار من وسط ذي قرينة انكسار منخفضة نسبياً إلى وسط ذي قرينة انكسار مرتفعة نسبياً.

يمكن التعبير أيضاً عن هذه المعادلة على الشكل:

$$s \sin y = r \sin x$$

انظـــر الآن إلى الشكل (19–4). مرة أخرى، ليكن B حدّاً مسطحاً بين وسطين M_r وM_s، وقرينتا انكـــسارهما المطلقـــة r وs على التوالي. تخيل في هذه الحالة أن $r > s$، أي يمر الشعاع من وسط ذي قرينة انكـــسار مرتفعة نسبياً إلى وسط ذي قرينة انكسار منخفضة نسبياً. لنُعرِّف N، وB، وP، وR، وS، وx، وy كما عرّفناها في المثال السابق. كما سبق، يكون $y = x$، إذا، وفقط إذا، ارتطم الشعاع R بالمستوى B بـــزاوية ورود 0^o. وبالتالي يقع المستقيم N، والشعاع R، والشعاع S في المستوى نفسه، ويكون $y > x$. يصبح قانون سنل في هذه الحالة، تماماً كما في الحالة الموصوفة سابقاً:

$$\sin y/\sin x = r/s \text{ و } s \sin y = r \sin x$$



الشكل (19–4): شعاع مار من وسط ذي قرينة انكسار مرتفعة نسبياً إلى وسط ذي قرينة انكسار منخفضة نسبياً.

تحديد الزاوية الحرجة

عد ثانية إلى الشكل (19–4). يمر الضوء من وسط ذي قرينة انكسار مرتفعة نسبيا r إلى وسط ذي قـــرينة انكـــسار منخفضة نسبياً s. وبالتالي $r > s$. بزيادة الزاوية x، تقترب y من 90^o، ويصبح الشعاع s أقـــرب إلى حـــدّ المستوى B. عندما تصبح x، زاوية الورود، كبيرة كفاية (قيمة تقع بين 0^o و90^o)، تبلغ الزاوية y القيمة 90^o، ويقع المستقيم S في المستوى B تماماً. إذا ازدادت x أكثر من ذلك، يخضع الشعاع r إلى انعكاس كلي داخلي عن المستوى الحدي B. أي يتصرف الحد كمرآة.

الــزاوية الحــرجة هي أكبر زاوية ورود يشكلها الشعاع R مع الناظم N دون انعكاسه داخلياً. دعنا ندعو هذه الزاوية x_c. تُقاس الزاوية الحرجة بالتابع العكسي لجيب نسبة قرائن الانكسار:

$$x_c = \sin^{-1} (s/r)$$

مسألة (19-2)

افتــرض أنه تم وضع ليزر تحت سطح بركة ماء عذب. وكانت قرينة انكسار الماء العذب تساوي 1.33 تقــريباً، بينما تساوي قرينة انكسار الهواء 1.00. تخيل أن السطح صقيل بشكل كامل. إذا جــرى توجــيه الليزر للأعلى بحيث يرتطم بالسطح بزاوية 30.0° بالنسبة للناظم (العامود)، بأي زاوية، بالنسبة للناظم أيضاً، ستنطلق الحزمة من السطح في الهواء؟

حل (19-2)

تــصور الحالة في الشكل (19-4) "من الأعلى للأسفل". وبالتالي يُمثِّل M_r الماء ويُمثِّل M_s الهواء. قــرائن الانكــسار هي $r = 1.33$ و$s = 1.00$. قياس الزاوية x يساوي 30.0°. المجهول هو قياس الزاوية y. استخدم معادلة قانون سنل، عوِّض الأعداد، وقم بحل المعادلة لإيجاد y. ستحتاج إلى آلة حاسبة. وهكذا يجري الحل:

$$\sin y/\sin x = r/s$$

$$s \text{ in } y/(\sin 30.0°) = 1.33/1.00$$

$$\sin y/0.500 = 1.33$$

$$\sin y = 1.33 \times 0.500 = 0.665$$

$$y = \sin^{-1} 0.665 = 41.7°$$

مسألة (19-3)

ما هي الزاوية الحرجة لأشعة ضوئية تُشع من بركة ماء عذب باتجاه الأعلى؟

حل (19-3)

اســتخدم صــيغة الزاوية الحرجة، وتصور سيناريو المسألة (19-2)، حيث يمكن تغيير زاوية ورود الليزر x. عوِّض الأرقام في المعادلة لإيجاد الزاوية الحرجة x_c:

$$x_c = \sin^{-1} (s/r)$$

$$x_c = \sin^{-1} (1.00/1.33)$$

$$x_c = \sin^{-1} 0.752$$

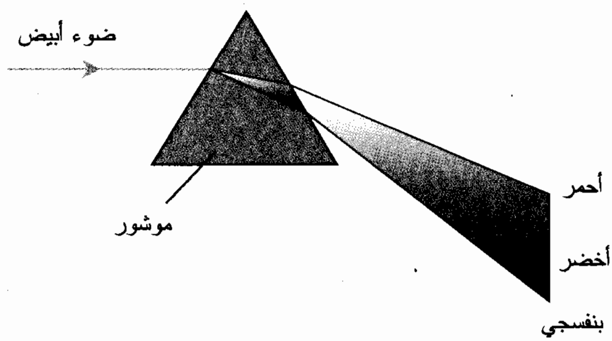
$$x_c = 48.8°$$

تذكر أن جميع الزوايا في هذه الحالات محددة بالنسبة للناظم على السطح، وليس بالنسبة إلى مستوى السطح.

القزح

تعتمد قرينة انكسار مادة معينة على طول موجة الضوء المار فيها. يُبطِّئ الزجاج الضوء أكثر ما يمكن في الأطوال الموجية القصيرة (الأزرق والبنفسجي) وأقل ما يمكن في الأطوال الموجية الطويلة (الأحمر والبرتقالي). يُعرف تغيّر قرينة الانكسار بتغيّر طول الموجة *بالقزح*. إنه المبدأ الذي يعمل وفقه الموشور (الشكل (19-5)). كلما ازداد إبطاء الزجاج للضوء، كلما انحرف الضوء عن مساره عند مروره في الموشور. وهذا هو سبب إطلاق المواشير لأقواس قزح عند إشعاع الضوء الأبيض فيها.

إن القزح هام في البصريات لسببين. الأول، يمكن استخدام الموشور لإنشاء *مقياس الطيف*، وهو جهاز يُستخدم لفحص شدة الضوء المرئي لأطوال موجية محددة. (تُستخدم أيضاً حواجز دقيقة لهذه الغاية). الثاني، يخفض القزح من جودة صور الضوء الأبيض التي يجري معاينتها من خلال عدسات بسيطة.



الشكل (19-5): القزح مسؤول عن حقيقة أن الموشور الزجاجي "يفلق" الضوء الأبيض إلى الألوان التي تشكله.

العدسات والمرايا

يمكن الاستفادة من طرق انعكاس وانكسار الضوء المرئي. جرى اكتشاف ذلك لأول مرة عندما وجد المجربون أنه يمكن بواسطة قطع زجاجية ذات أشكال خاصة جعل الأجسام تبدو أكبر أو أصغر مما هي عليه في الحقيقة. استُخدمت الخصائص الانكسارية للزجاج لقرون للمساعدة على تصحيح العجز في الرؤية الذي يحدث عند تقدم الإنسان في العمر. تعمل العدسات لأنها تكسر الضوء أكثر أو أقل اعتماداً على زاوية ورود الضوء، وعلى مكان ارتطام الضوء بسطوحها. للمرايا المنحنية التأثير نفسه عندما تعكس الضوء.

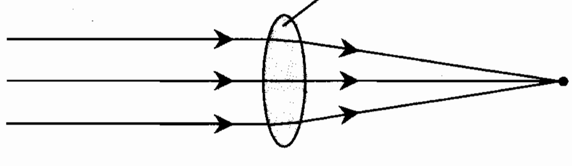
العدسة المُحدَّبة

يمكنك شراء عدسة مُحدَّبة من أي متجر للحلي أو من أي متجر ضخم. يجب أن تكون قادراً على إيجاد "زجاج مُكبِّر" في مخزن للهواة بقطر 10 cm أو حتى 15 cm. ظهر الاصطلاح *مُحدَّب* من حقيقة أن

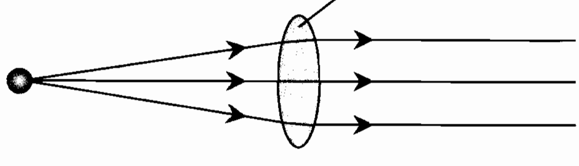
أحـد وجوه الزجاج أو كلاهما يبرز خارجاً عن المركز. تُدعى العدسة المُحدَّبة في بعض الأحيان *بالعدسة المُقـرِّبة*. إنهـا تُركِّـز أشعة الضوء المتوازية في *محرق حادة أو في نقطة محرقية*، كما هو موضح في الشكل (19-6-أ)، ذلك عندما تكون هذه الأشعة موازية لمحور العدسة. يمكنها أيضاً جعل أشعة الضوء الواردة من مُزوِّد ضوء نقطي *متوازية*، كما هو موضح في الشكل (19-6-ب).

تعـتمد خصائص العدسة المُحدَّبة على قطرها وعلى فرق السماكة بين الحواف والمركز. كلما ازداد قطـر العدسة، كلما ازدادت قدرتها على جمع الضوء. كلما ازداد الفرق في السماكة بين الحواف والمركز، كلمـا قـصرت المسافة بين العدسة والنقطة التي يجري منها جلب أشعة الضوء المتوازية إلى المحرق. تُقاس المنطقة الفعالة في العدسة في مستوى عامودي على المحور، وتُعرف *بسطح تجميع الضوء*. تدعى المسافة بين مركز العدسة والنقطة المحرقية بالطول المحرقي (كما في الشكل 19-6-أ أو 19-6-ب). إذا نظرت عن قرب مـن خلال عدسة مُحدَّبة إلى جسم كقطعة نقود، تكون المعالم مُكبّرة؛ إنها تظهر أكبر مما تبدو عليه للعين دون مـساعدة العدسة. تتقارب الأشعة الضوئية الواردة من جسم يقع على مسافة كبيرة من عدسة مُحدَّبة لتشكل *صورة حقيقية* في النقطة المحرقية.

إن سـطوح معظم العدسات المُحدَّبة كروية. وهذا يعني أنه إذا استطعت إيجاد كرة كبيرة لها القطر الصحيح، سينسجم منحنى وجه العدسة مع الكرة تماماً. تكون أنصاف أقطار انحناء بعض العدسات المُحدَّبة متماثلة، وتكون أنصاف أقطار انحناء وجهي بعض العدسات المُحدَّبة الأخرى مختلفة. لبعض العدسات وجه مسطح واحد؛ وتدعى هذه *بالعدسات المُحدَّبة المستوية*.



(أ)



(ب)

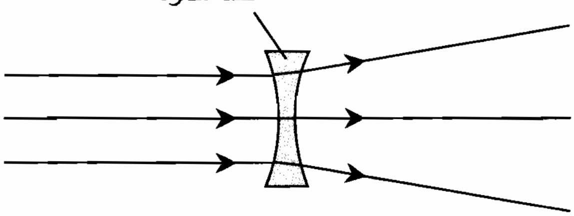
الشكل (19-6): (أ) تُركِّز العدسة المُحدَّبة الأشعة الضوئية في نقطة. (ب) تجعل العدسة الأشعة الضوئية الواردة من مُزوِّد نقطي يقع في المحرق متوازية.

العدسة المُقعَّرة

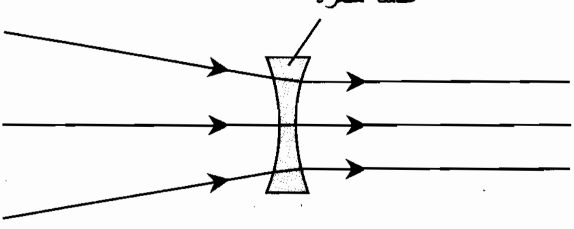
ستجد بعض المشاكل لإيجاد *عدسة مُقعَّرة* في متجر ضخم، ولكن يجب أن تكون قادراً على طلب عدسة من مدرج (كتالوج) متخصص. أو من موقع وب. يُشير مصطلح *مُقعَّر* إلى حقيقة أن وجه العدسة أو كلا وجهيها يبرزان باتجاه الداخل أي باتجاه المركز. يدعى هذا النوع من العدسات *بالعدسة المُبعِّدة*. إنها تنشر أشعة الضوء المتوازية خارجاً (الشكل (19-7-أ)). تجعل هذه العدسة الأشعة المتقاربة متوازية إذا كانت زاوية التقارب قائمة (الشكل (19-7-ب)).

كما في العدسات المُحدَّبة، تعتمد خصائص العدسة المُقعَّرة على القطر وعلى مدى تسطح السطح (السطوح). كلما ازداد فرق السماكة بين الحواف ومركز العدسة، كلما باعدت العدسة أشعة الضوء المتوازية. إذا نظرت عن بعد إلى جسم كقطعة نقود من خلال عدسة مُقعَّرة، ستتقلص المعالم؛ وستظهر أصغر مما تبدو عليه للعين دون مساعدة العدسة.

تكون سطوح العدسات المُقعَّرة، كنظيراتها المُحدَّبة، كروية بشكل عام. تكون أنصاف أقطار انحناء وجهي بعض العدسات المُقعَّرة متماثلة، وتكون أنصاف أقطار انحناء وجهي بعض العدسات المُقعَّرة الأخرى مختلفة. لبعض العدسات المُقرِّبة وجه مسطح واحد؛ وتدعى هذه *بالعدسات المُقعَّرة المستوية*.



(أ)

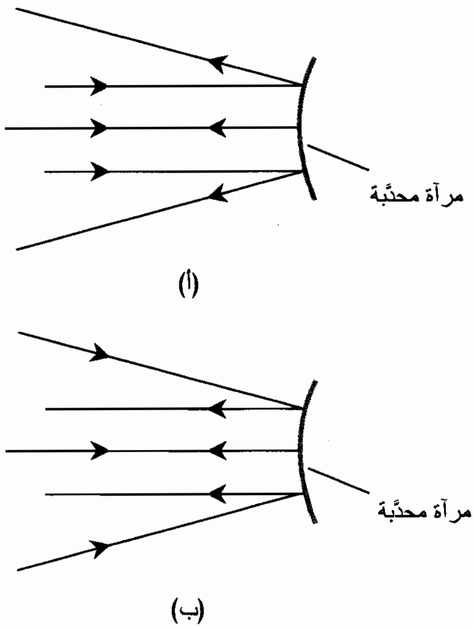


(ب)

الشكل (19-7): (أ) تنشر العدسة المُقعَّرة الأشعة الضوئية المتوازية.
(ب) تجعل العدسة نفسها الأشعة الضوئية المتقاربة متوازية.

المرآة المُحدَّبة

تعكس *المرآة المُحدَّبة* الأشعة الضوئية بطريقة يكون التأثير فيها مشابهاً لتأثير العدسة المُقعَّرة. تنتشر الأشعة الواردة عندما تكون متوازية (الشكل (19-8-أ)) بعد انعكاسها عن السطح. تجعل المرآة المُحدَّبة الأشعة الواردة المتقاربة، إذا كانت زاوية التقارب قائمة، متوازية (راجع الشكل (19-8-ب)). عندما تنظر إلى المنظر المنعكس عن مرآة مُحدَّبة، تظهر الأجسام منه مُقلّصة. يجري توسيع حقل الرؤية، حيث تُستخدم بعض هذه المرايا للرؤية الخلفية في المركبات.

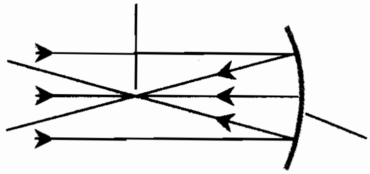


الشكل (19-8): (أ) تنتشر المرآة المُحدَّبة أشعة الضوء المتوازية الواردة.
(ب) تجعل المرآة نفسها أشعة الضوء الواردة المتقاربة متوازية.

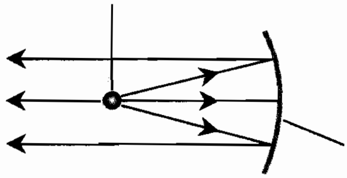
يعتمد مدى نشر المرآة المُحدَّبة للأشعة الضوئية على نصف قطر الانحناء. كلما صغر نصف قطر الانحناء، كلما كبر مدى تباعد الأشعة الواردة المتوازية بعد الانعكاس.

المرآة المُقعَّرة

تعكس *المرآة المُقعَّرة* الأشعة الضوئية بأسلوب مشابه للأسلوب الذي تكسر به العدسة المُحدَّبة الأشعة الضوئية. عندما تكون الأشعة الواردة متوازية وموازية لمحور المرآة، فإنها تنعكس بحيث تتقارب في نقطة محرقية (الشكل (19-9-أ)). عند وضع مُزوِّد ضوء نقطي في نقطة المحرق، تعكس المرآة المُقعَّرة الأشعة بحيث تنبعث متوازية (راجع الشكل (19-9-ب)).



(أ)



(ب)

الشكل (19-9): (أ) تركز المرآة المُقعَّرة أشعة الضوء المتوازية في نقطة. (ب) تجعل المرآة نفسها الأشعة الضوئية الصادرة عن مُزوِّد نقطي موضوع في المحرق متوازية.

تعتمد خصائص المرآة المُقعَّرة على حجم السطح العاكس، وتعتمد كذلك على نصف قطر الانحناء. كلما ازداد سطح تجميع الضوء، كلما ازدادت القدرة على جمع الضوء. كلما صغر نصف قطر الانحناء، كلما قصر الطول المحرقي. إذا نظرت إلى صورتك المنعكسة عن مرآة مُحدَّبة، سترى التأثير نفسه الذي كنت ستلاحظه لو وضعت عدسة مُحدَّبة في مقابل مرآة مسطحة.

يمكن أن تكون سطوح المرايا المُقعَّرة كروية، ولكن تتبع سطوح أدق المرايا الخط الخارجي للشكل المثالي ثلاثي الأبعاد الذي يدعى *paraboloid*. ينتج Paraboloid عن دوران القطع المكافئ كالقطع ذي المعادلة $y = x^2$ في الإحداثيات الديكارتية، حول محوره. عندما يكون نصف قطر الانحناء كبيراً مقارنة بحجم السطح العاكس، يكون الفرق بين *المرآة الكروية والمرآة* ***parabolidal*** (وتدعى *المرآة* ***parabolic*** بشكل شائع) مهملاً بالنسبة للمراقب العادي. ولكن، يكون الفرق كبيراً عند استخدام المرآة في التلسكوب (المقراب).

مسألة (19-4)

افترض أن عدسة بسيطة مصنوعةً من المادة نفسها التي يصنع منها الموشور الذي يبث قوس قزح عند إشعاع الضوء الأبيض فيه. ما هو الطول المحرقي لهذه العدسة بالنسبة للضوء الأحمر مقارنة بالطول المحرقي بالنسبة للضوء الأزرق؟

حل (19-4)

إن قرينة انكسار الزجاج قرينة انكسار أعلى بالنسبة للضوء الأزرق منها للضوء الأحمر. لذلك، يحني الزجاج الضوء الأزرق بشكل أكبر، مما يؤدي لقصر الطول المحرقي للأزرق مقارنة بالأحمر.

التلسكوبات الكاسرة

جرى تطوير التلسكوبات الأولى في القرن السابع عشر. وتم توظيف العدسات. يدعى أي تلسكوب يُكبِّر الصور البعيدة ويحوي عدسات *بالتلسكوب الكاسر*.

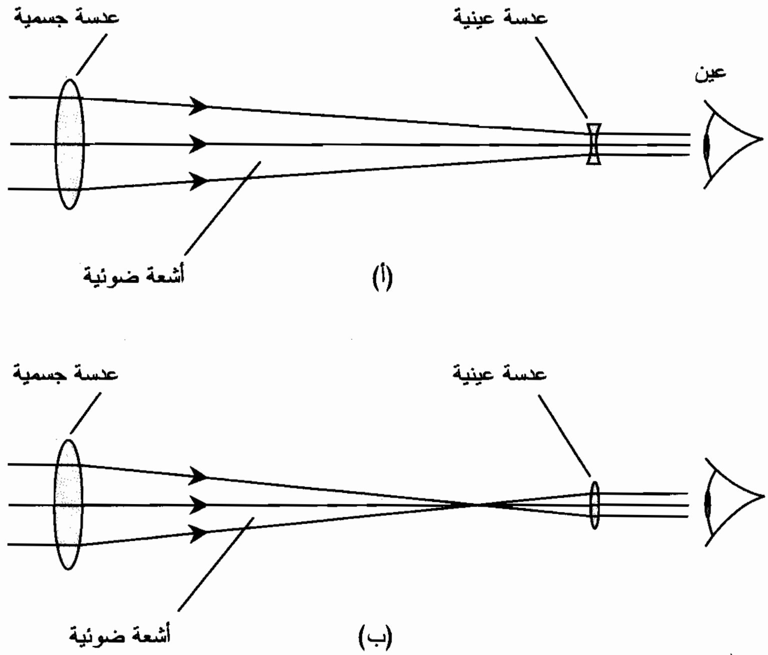
الكاسر الغاليلي

ابتكر غاليلو غاليلي، والذي كان مشهوراً في القرن السابع عشر لملاحظته الفوهات على القمر والأقمار الطبيعية التي تدور حول المشتري، تلسكوباً يتكون من عدسة جسمية *مُحدَّبة* وعدسة عينية *مُقعَّرة*. يُكبر تلسكوبه الأول الأقطار الظاهرة للأجسام البعيدة بعامل يبلغ عدة أضعاف فقط. وتُكبِّر بعض تلسكوباته اللاحقة بعامل يصل إلى 30 ضعفاً. يُنتج *الكاسر الغاليلي* (الشكل (19-10-أ)) *صورة قائمة*، أي، ينتج منظراً علوياً يمينياً للأجسام. وتكون الصور من اليمين إلى اليسار صحيحة أيضاً. يُعرّف *عامل التكبير* على أنه عدد المرات التي تضاعفت بها الأقطار الزاويّة للأجسام البعيدة، ويعتمد على الطول المحرقي للعدسة الجسمية، ويعتمد كذلك على المسافة بين العدسة الجسمية والعدسة العينية.

تتوفر الكاسرات الغاليلية اليوم كأجهزة صغيرة مستخدمة في الرؤية الأرضية. احتوت كاسرات غاليلو الأصلية على عدسات جسمية عرضها 2 أو 3 cm فقط (حوالى 1 in). ينطبق الأمر نفسه على معظم التلسكوبات الغاليلية اليوم. تحوي بعض هذه التلسكوبات أنابيب منزلقة متحدة المركز توفر تكبيراً متغيراً. عند دفع الأنبوب الداخلي داخل الأنبوب الخارجي، يصغر عامل التكبير؛ عند سحب الأنبوب الداخلي خارجاً، يكون التكبير أكبر ما يمكن. تبقى الصورة واضحة إلى حدّ ما ضمن المجال التكبير الكلي الذي جرى تعيير التلسكوب عليه. تدعى هذه الأدوات في بعض الأحيان *بالمناظير*.

الكاسر الكبلري

قام جوهان كبلر، والذي كان جمهوره أكثر وداً من جمهور غاليلو الذي أجبره جمهوره على تغيير نظرياته المتعلقة بالكون، بتعديل تصميم تلسكوب غاليلو. وظّف تلسكوب كبلر الكاسر عدسة جسمية مُحدَّبة بطول محرقي طويل وعدسة عينية أصغر بطول محرقي قصير. يُنتج *الكاسر الكبلري* (راجع الشكل (19-10-ب)) *صورة معكوسة* وذلك بشكل مختلف عن التلسكوب الغاليلي: تكون الصورة من الأعلى للأسفل ومعكوسة. لتكون الصورة واضحة يجب أن تكون المسافة بين العدسة الجسمية والعدسة العينية مساوية تماماً إلى مجموع الأطوال المحرقية للعدستين. يعتمد عامل التكبير على نسبة الطول المحرقي للعدسة العينية إلى الطول المحرقي للعدسة الجسمية.



الشكل (19-10): الكاسر الغاليلي (أ) يستخدم عدسة جسمية مُحدَّبة وعدسة عينية مُقعَّرة. الكاسر الكبلري (ب) له عدسة جسمية مُحدَّبة وعدسة عينية مُحدَّبة.

يُفضَّل التلسكوب الكبلري على النوع الغاليلي بالدرجة الأولى لأن *حقل الرؤية الظاهري أكبر* في تصميم كبلر. تكون حقول الرؤية الظاهرية في التلسكوبات الغاليلية عموماً ضيقة جداً بحيث يكون النظر من خلالها تجربة غير مريحة. يمكن تغيير عامل تكبير التلسكوب الكبلري باستخدام عدسات جسمية ذات أطوال محرقية طويلة وقصيرة. كلما كان الطول المحرقي للعدسة العينية قصيراً، كلما كبر عامل التكبير، والذي يُعرف بشكل غير رسمي بقوة التكبير، على افتراض بقاء الطول المحرقي للعدسة الجسمية ثابتاً.

يتواجد أكبر تلسكوب كاسر في العالم في مختبر بيركس في ويست كونس. يبلغ قطر العدسة الجسمية 40 in (أكبر بقليل من 1 m). تُستخدم الكواسر الكبلرية في آلات الفلكيين الهواة عبر العالم.

محدودية الكواسر

توجد مشاكل معيّنة متأصلة في التلسكوبات التي تستخدم العدسات الجسمية. وتعرف هذه المشاكل *بالزيغ الكروي والزيغ اللوني وترهل العدسة*.

ينتج الزيغ الكروي من حقيقة أن العدسات المُحدَّبة الكروية لا تجلب الأشعة الضوئية المتوازية إلى محرق مثالي. يُركّز التلسكوب الكاسر ذو العدسة الجسمية الكروية الشعاع المار في حافته بشكل مختلف قليلاً عن تركيزه للشعاع المار بالقرب من المركز. إن المحرق الفعلي للعدسة الجسمية ليس نقطة بل هو خط قصير جداً يقع على طول محور العدسة. يسبب هذا التأثير طمس صور الأجسام التي لها أقطار زاويّة كبيرة

نسبياً، كالمجرات والغيوم السديمية. يمكن تصحيح المشكلة عبر شحذ العدسة الجسمية بحيث يكون سطحها Paraboloidal بدلاً من أن يكون سطحها كروياً.

يحدث الزيغ اللوني لأن الزجاج في العدسة البسيطة يكسر أطوال أمواج الضوء القصيرة أكثر قليلاً من كسره للأطوال الموجية الطويلة. يكون الطول المحرقي لأي عدسة مُحدَّبة أقصر بالنسبة للضوء البنفسجي مقارنة بالضوء الأزرق، وأقصر للأزرق مقارنة بالأصفر، وأقصر للأصفر مقارنة بالأحمر. ينتج عن ذلك هالات بألوان قوس قزح حول صور النجوم وحول حواف الأجسام المحددة بحدة وذات الأقطار الزاويّة الكبيرة. يمكن تصحيح الزيغ اللوني بشكل تقريبي ولكن ليس بشكل كامل باستخدام *العدسات المُركّبة*. إنّ لهذه العدسات مقطعين أو أكثر مصنوعين من أنواع مختلفة من الزجاج؛ تُلصق المقاطع مع بعضها بمادة شفافة سريعة الالتصاق. تدعى هذه العدسات الجسمية *بالعدسات اللالونية* وتشكل مادة أساسية في التلسكوبات الكاسرة هذه الأيام.

يحدث ترهل العدسة في التلسكوبات الكاسرة الكبيرة. عندما يكون قطر العدسة الجسمية أكبر من 1 m تقريباً، فإنها تصبح ثقيلة جداً بحيث يشوه وزنها شكلها. الزجاج ليس صلباً بشكل كامل، كما لاحظت إذا رأيت انعكاس منظر طبيعي على نافذة كبيرة في يوم عاصف. لا توجد أي طريقة للتخلص من هذه المشكلة باستثناء نقل التلسكوب خارج حقل الجاذبية الأرضية.

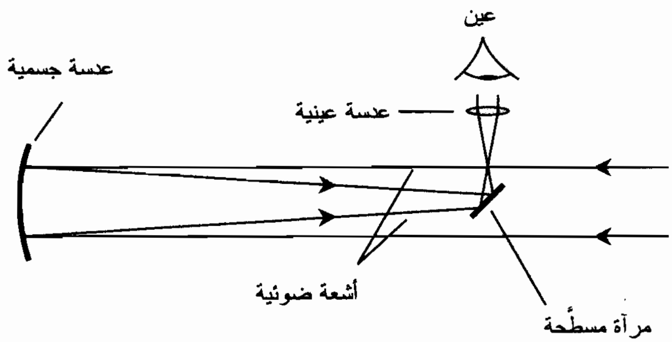
التلسكوبات العاكسة

يمكن التغلب على المشاكل التي عانيت منها في التلسكوبات الكاسرة، وخاصة مشكلة ترهل العدسة، باستخدام المرايا بدلاً من استخدام العدسات كالعدسات الجسمية. يمكن وضع *السطح الأول للمرآة*، مع تفضيض القسم الخارجي بحيث لا يمر الضوء أبداً من خلال الزجاج، وبحيث يُجلَب الضوء إلى المحرق الذي لا يتغيّر بتغيّر طول الموجة. يمكن دعم المرايا من الخلف، بحيث تُصنَّع بأقطار أكبر بعدة أضعاف من العدسات دون مواجهة مشكلة الترهل.

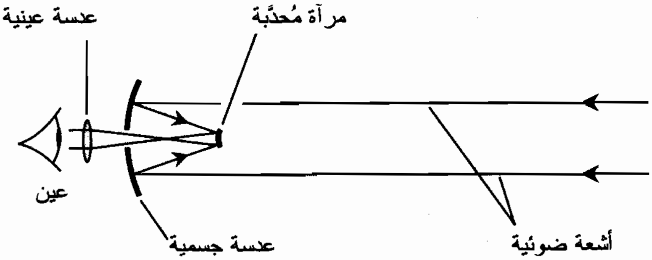
العاكس النيوتوني

صمم اسحق نيوتن *تلسكوباً عاكساً* خالياً من الزيغ اللوني. لا يزال تصميمه مستخدماً في الكثير من التلسكوبات العاكسة اليوم. يُوظّف *العاكس النيوتوني* مرآة جسمية مُقعَّرة مثبتة في إحدى نهايات أنبوب طويل. تكون النهاية الأخرى للأنبوب مفتوحة لاستقبال الضوء الوارد. تُثبّت مرآة صغيرة مسطحه بزاوية 45° بالقرب من النهاية المفتوحة للأنبوب الذي يحتوي العدسة العينية ليمر الضوء من شق في جانب الأنبوب الذي يحتوي العدسة العينية (الشكل (19-11-أ).

تحجب المرآة المسطحة بعض الضوء الوارد لتُخفض بشكل طفيف مسافة السطح الفعال للمرآة الجسمية. كمثال نموذجي، افترض أن قطر المرآة الجسمية للعاكس النيوتوني 20 cm. وأن مساحة السطح الكلي للمرآة تساوي تقريباً 314 سنتمتر مربع (cm^2). إذا كانت المرآة العينية عبارة عن مربع طول ضلعه 3- سنتمرمربع، فإن مساحتها الكلية 9 cm^2، والتي تساوي 3 بالمائة من مساحة السطح الكلي للمرآة الجسمية.



(أ)



(ب)

الشكل (19-11): العاكس النيوتوني (أ) توضع المرآة العينية داخل الأنبوب. في العاكس الكاسغرين (ب)، توضع العدسة العينية في مركز المرآة الجسمية.

يوجد للعواكس النيوتونية حدود. يجد بعض الناس أنه من غير الطبيعي "النظر بشكل جانبي" للأشياء. إذا كان للتلسكوب أنبوب طويل، من الضروري عندها استخدام سُلّم لرؤية الأجسام التي تقع على ارتفاعات عالية. يمكن التغلب على هذه الإزعاجات باستخدام طريقة أخرى لتوجيه الضوء إلى المرآة العينية.

عاكس الكاسغرين

يوضح الشكل (19-11-ب) تصميم *عاكس الكاسغرين*. تُثبَّت المرآة المُحدَّبة كما هو موضح في الشكل. يزيد تحدب هذا المرآة من الطول المحرقي الفعال للمرآة الجُسيْمة. ينعكس الضوء عن المرآة المُحدَّبة ويمر في ثقب صغير في مركز العدسة الجسمية التي تحوي العدسة العينية.

يمكن صناعة عاكس الكاسغرين باستخدام أنبوب قصير فيزيائياً واستخدام مرآة جسمية ذات تقوس أكبر من تقوس المرآة الموجودة في التلسكوب النيوتوني الذي يكون له القطر نفسه. بالنتيجة، يكون

تلـــسكوب الكاســـغرين أقل وزناً وأقل ضخامة. إن عواكس الكاسغرين عملية ومستقرة فيزيائياً، ويمكن استخدامها بمُعامل تكبير منخفض للحصول على رؤية واسعة لجزء كبير من السماء.

مواصفات التلسكوب

تُعتبر بعض المُعاملات هامة عند تحديد فعالية التلسكوب في التطبيقات المختلفة. وهذه بعض المُعاملات الأكثر أهمية.

التكبير

التكـــبير، ويدعى أيضاً بالقوة ويُرمَز له ×، وهو مدى تكبير الأجسام بحيث تبدو أقرب. (فعلياً، تزيد التلـــسكوبات حجـــم الأجسام البعيدة التي يجري مراقبتها، ولكنها لا تبدو قريبة للعين). التكبير هو قياس لعامل ازدياد القطر الزاوي الظاهري للجسم. يجعل تلسكوب 20× القمرَ، الذي يقابل قطراً قوسه 0.5° إذا راقبناه بالعين، يظهر بقطر قوسه 10°. يجعل تلسكوب 180× الفوهةَ على القمر التي تقابل قطر زاوي قوسه 1 دقيقة ($^1/_{60}$ من الدرجة)، تظهر بقطر قوسه 3°.

يُحسب التكبير بدلالة الأطوال المحرقيه للعدسات الجسمية والعينية. إذا كان f_o الطول المحرقي الفعال للمرآة الجسمية، وf_e الطول المحرقي للمرآة العينية (بوحدات f_o نفسها)، وبالتالي يعطي عامل التكبير m بالصيغة:

$$m = f_o / f_e$$

بالنـــسبة لمرآة عينية معيِّنة، يزداد تكبير التلسكوب أيضاً بزيادة الطول المحرقي الفعال للمرآة الجسمية. بالنسبة لمرآة جسمية معينة، بزيادة الطول المحرقي الفعال للمرآة العينية، ينقص تكبير التلسكوب.

الدقة

الدقـــة، وتدعـــى أيـــضاً *بالقدرة على التمييز*، هي إمكانية التلسكوب على الفصل بين جسمين غير موجـــودين تمامـــاً في المكـــان نفسه من السماء. تقاس الدقة كالزوايا، وتُقاس عادةً بقوس طوله بالثواني (وحدات من $^1/_{3600}$ درجة). كلما كان العدد أصغر كلما كانت الدقة أفضل.

إن الطـــريقة الأفـــضل لقياس قدرة التلسكوب على التمييز هي بمسح السماء بين أزواج معلومة من النجوم تظهر قريبة من بعضها بالمعنى الزاوي. تُحدد خرائط البيانات الفلكية أزواج النجوم لاستخدامها لهذا الهـــدف. الطريقة الأخرى هي فحص القمر واستخدام خريطة مفصلة للسطح القمري للتحقق من مقدار التفصيل الذي يستطيع التلسكوب إظهاره.

تـــزداد الدقـــة بازديـــاد التكبير، ولكن إلى حدّ معين. تتناسب الدقة الكبرى للصورة التي يستطيع التلسكوب تزويدها طرداً مع قطر العدسة أو قطر المرآة الجسمية، صعوداً لحد أعظمي معين يمليه اضطراب الغلاف الجوي. بالإضافة لذلك، تعتمد الدقة على حدة بصر المراقب (إذا كانت الرؤية المباشرة مُعمّقة) أو على خشونة الحبيبات الفوتوغرافية أو السطح المكتشف (إذا استخدمت كاميرا تماثلية أو رقمية).

سطح تجميع الضوء

إن ســـطح تجميع الضوء في التلسكوب هو مقياس كمي لقدرته على تجميع الضوء للمشاهدة. يمكن تحديدها بالسنتمترات المربعة (cm^2) أو بالأمتار المربعة (m^2)، أي بدلالة مساحة السطح الفعال للعدسة أو للمـــرآة الجـــسمية مقاسة في مستوى عامودي على محورها. يجري التعبير عنه في بعض الأحيان بالبوصات المربعة (in^2).

بالنـــسبة لتلـــسكوب كاسر، إذا أعطينا نصف قطر العدسة الجسمية r، يمكن حساب سطح تجميع الضوء A باستخدام الصيغة:

$$A = \pi r^2$$

حـــيث تـــساوي π تقريباً 3.14159. إذا جرى التعبير عن r بالسنتمترات، تكون A بالسنتمترات المربعة؛ وإذا كان r بالأمتار، بالتالي ستكون A بالأمتار المربعة.

بالنـــسبة للتلـــسكوب العاكس، إذا أُعطينا نصف قطر المرآة الجسمية r، يمكن حساب سطح تجميع الضوء A باستخدام الصيغة:

$$A = \pi r^2 - B$$

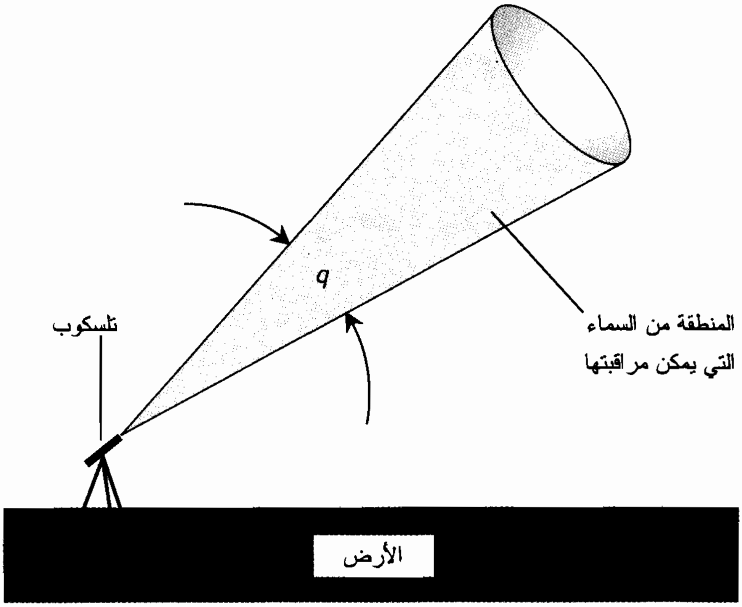
حـــيث تمثل B سطح تجميع الضوء والذي جرى حجبه نتيجة تركيب المرآة الثانوية. إذا جرى التعبير عن r بالسنتمترات وB بالسنتمترات المربعة، يكون A بالسنتمترات المربعة؛ وإذا جرى التعبير عن r بالأمتار وB بالأمتار المربعة، تكون A بالأمتار المربعة.

حقل الرؤية المطلق

عند النظر من خلال العدسة الجسمية للتلسكوب، فإنك ترى رقعة دائرية من السماء. يمكنك فعلياً، أن تـــرى أي جـــسم ضـــمن منطقة مخروطية الشكل وبحيث يكون رأس المخروط واقعاً على التلسكوب (الـــشكل (19–12)). إن *حقـــل الـــرؤية المطلق* هو القطر الزاوي q لهذا المخروط؛ يمكن تحديد q بقوس بالدرجات و/أو بالدقائق، و/أو بالثواني. يجري في بعض الأحيان تحديد نصف القطر الزاوي بدلاً من تحديد القطر الزاوي.

يعتمد الحقل المطلق للرؤية على عدة عوامل. يُعتبر تكبير التلسكوب عاملاً هاماً. يتناسب حقل الرؤية المطلـــق عكسياً مع التكبير مع بقاء العوامل الأخرى ثابتة. إذا تضاعف التكبير، ينخفض الحقل إلى النصف؛ إذا انخفض التكبير إلى ربع القيمة السابقة، يزداد الحقل بمقدار أربعة أضعاف.

إن زاوية الرؤية– أي حقل الرؤية الظاهري – الذي تُزوِّده العدسة الجسمية هام. يكون الحقل واسعاً في بعـــض أنواع العدسات الجسمية، مثل 60° أو حتى 90°. وتمتلك عدسات أخرى حقولاً ظاهرية ضيقة، وفي بعض الأحيان أقل من 30°.



الشكل (19-12): يقاس حقل الرؤية المطلق q في التلسكوب بقوس دائري بالدرجات، و/أو، بالدقائق، و/أو بالثواني.

يؤثر عامل آخر على حقل الرؤية المطلق وهو نسبة قطر العدسة الجسمية إلى طولها المحرقي. في الحالة العامة، كلما كانت هذه النسبة أكبر، كلما كان حقل الرؤية المطلق الأعظم والذي يمكن الحصول عليه من التلسكوب، أكبر. تكون حقول الرؤية المطلقة العظمى صغيرة في التلسكوبات الضيقة والطويلة؛ أما حقول الرؤية المطلقة العظمى في التلسكوبات القصيرة والعريضة فهي حقول كبيرة.

مسألة (19-5)

ما هي كمية الضوء التي يستطيع تلسكوب كاسر قطر عدسته الجسمية 15.0 cm جمعها مقارنة مع تلسكوب عاكس قطر مرآته الجسمية 6.00 cm؟ عبِّر عن الجواب على شكل نسبة مئوية.

حل (19-5)

يتناسب سطح تجميع الضوء مع مربع نصف قطر العدسة أو المرآة الجسمية. لذلك تتناسب نسبة سطح تجميع الضوء الأكبر للتلسكوب إلى مسافة جمع الضوء الأصغر للتلسكوب مع مربع نسبة أقطار العدسات الجسمية. دعنا ندعو النسبة k. وبالتالي في هذه الحالة

$$k = 15.0/6.00 = 2.50$$

$$k^2 = 2.50^2 = 6.25$$

يجمع التلسكوب الأكبر 6.25 ضعفاً أو 625 بالمائة، من الضوء الذي يجمعه التلسكوب الأصغر.

مسألة (19-6)

افترض أن عامل التكبير لتلسكوب يساوي 100×6 ويبلغ الطول المحرقي للعدسة الجسمية 20.0 mm. ما هو الطول المحرقي للعدسة العينية؟

حل (19-6)

استخدم الصيغة المذكورة في القسم المعنون "تكبير". إن قيمة f_o في هذه الحالة مجهولة؛ $f_e = 20.0$ mm، و$m = 100$. وبالتالي

$$m = f_o/f_e$$

$$100 = f_o/20.0$$

$$f_o = 100 \times 20.0 = 2{,}000 \text{ mm}$$

ناقشنا تقنياً التعبير عن الجواب بثلاثة أرقام هامة. يمكننا أن نقول وبشكل معقول إن $f_o = 2.00$ m.

مسألة (19-7)

افترض أن حقل الرؤية المطلق الذي يوفره التلسكوب في المسألة (19-6) هو قوس طوله 20 دقيقة. إذا اسُـتبدلت العدسة العينية 20-mm بعدسة عينية 10-mm بحيث توفر زاوية الرؤية نفسها التي توفرها العدسة العينية 20 - mm، ماذا يحدث للحقل المطلق للرؤية الذي يوفره هذا التلسكوب؟

حل (19-7)

تُزوِّد العدسة العينية 10-mm بضعفي التكبير الذي تُزوِّده العدسة العينية 20-mm. لذلك، يكون حقـــل الرؤية المطلق للتلسكوب الذي يستخدم عدسة عينية 10-mm مساوياً لنصف الاتساع أو القوس الذي يبلغ طوله 10 دقائق.

المجهر (الميكروسكوب) المُركَّب

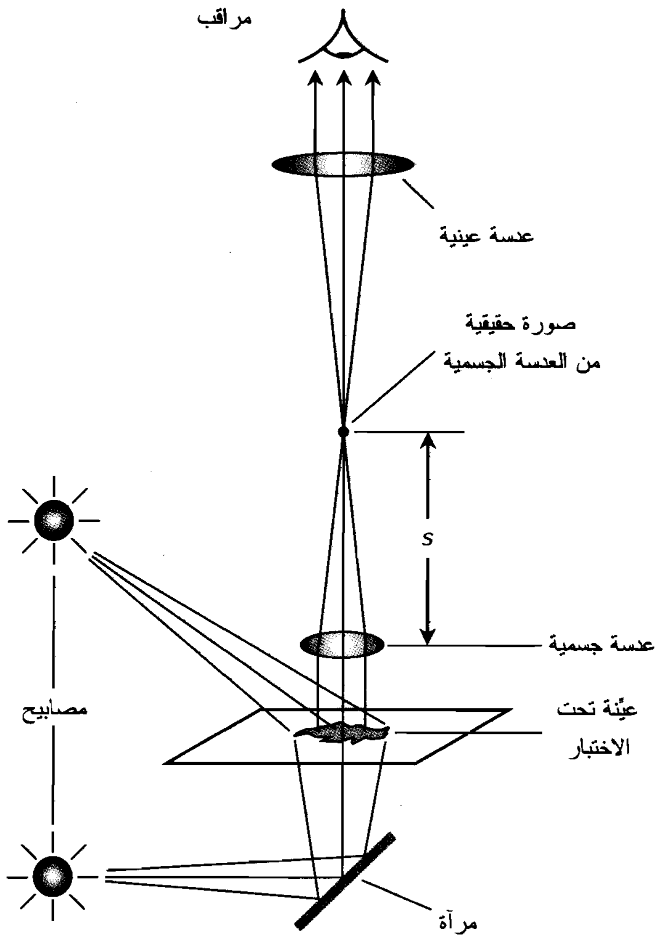
تم تـــصميم *المجاهر البصرية* لتكبير صور الأجسام الصغيرة جداً بشكل كبير لتمييزها بالعين المجردة. تعمل المجاهـــر مقارنة بالتلسكوبات في المجال القريب. يشبه تصميم المجهر في بعض الأحيان تصميم التلسكوب، ولكنه يخـــتلف عنه في أحيان أخرى. تتكون المجاهر البسيطة من عدسات مُحدَّبة مفردة. يمكنها أن تزود بعوامل تكبير تصل إلى 10× أو 20×. تُفضّل في المختبر آلة تدعى المجهر المُركَّب لأنه يُكبِّر بشكل كبير جداً.

المبدأ الأساسي

يُوظَّف المجهر المُركَّب عدستين. يكون الطول المحرقي للعدسة الجسمية قصيراً، ويبلغ في بعض الحالات 1 mm أو أقل، وتوضع بالقرب من العيِّنة لمراقبتها. ينتج عن ذلك صورة تقع فوق العدسة الجسمية بمسافة معينة، حيث ترد الأشعة الضوئية إلى المحرق. تكون المسافة (ولندعُها s) بين العدسة الجسمية وهذه الصورة أكبر دائماً من الطول المحرقي لهذه العدسة الجسمية.

يكـــون الطول المحرقي للعدسة العينية أطول من الطول المحرقي للعدسة الجسمية. وتُكبِّر العدسة العينية *الــصورة الحقــيقة* الــتي تُنتجها العدسة الجسمية. يمكن في المجهر التقليدي توفير الإنارة عبر إشعاع الضوء للأعلى عبر العيِّنة إذا كانت العيِّنة نصف شفافة. يُمثِّل الشكل (19-13) مخططاً مُبسّطاً لمجهر مُركَّب يوضح كيفية تركيز الأشعة الضوئية وكيفية إنارة العيِّنة.

تمـــتلك المجاهر المخبرية المُركَّبة عدستين جسميتين أو أكثر، ويمكن اختيارها بتدوير العجلة التي ترتبط بالعدســة الجسمية. يوفر ذلك عدة مستويات من التكبير بالنسبة لعدسة عينية معينة. عموماً، عندما يصبح الطــول المحرقـــي للعدســـة الجسمية قصيراً، يزداد تكبير المجهر. تستطيع بعض المجاهر المُركَّبة تكبير الصور حـــتى 2,500 مرة. يستطيع مجهر هواة مُركَّب توفير صورة بنوعية مناسبة بعوامل تكبير تصل إلى 1,000 ضعف.



الشكل (19-13): الإنارة والتركيز في المجهر الضوئي المُركَّب.

التركيز

يجـــري تركيز الضوء في المجهر المُركَّب من خلال تحريك المجموعة بكاملها، متضمنة كل من العدسة العينـــية والجسمية إلى الأعلى والأسفل. يجب إجراء ذلك وفق آلية دقيقة لأن *عمق الحقل* (الفرق بين أقصر مسافة وأطول مسافة من العدسة الجسمية التي يكون فيها الجسم بصورة واضحة بشكل جيد) صغير جداً. في الحالة العامة، كلما كان الطول المحرقي وكلما كان التركيز دقيقاً تكون أعماق حقول العدسات الجسمية من رتبة $2\ \mu m$ (2×10^{-6} m) أو حتى أقل.

إذا حركنا العدسة العينية إلى الأعلى والأسفل سيتغير التكبير في مجموعة أنبوب المجهر مع بقاء العدسة الجـــسمية ثابتة. ولكن، تُصمم المجاهر عادةً لتُزوِّد بصورة ذات جودة ممتازة من أجل مسافة فصل معينة بين العدسة الجسمية والعدسة العينية. مثل 16 cm (تقريباً 6.3 in).

إذا استُخدم مصباح إضاءة كاف لإنارة العيِّنة قيد التجربة، وخاصة إذا كانت العيِّنة شفافة أو نصف شفافة يمكن إنارتها من الخلف، وبحيث يمكن نـــزع العدسة العينية من المجهر ويمكن إسقاط صورة معقولة على شاشة في ســـقف الغـــرفة. تستطيع مرآة قطرية عكس هذه الصورة إلى شاشة مُثبتة في الجدار. تعمل هذه التقنية أفضل ما يمكن في العدسات الجسمية ذات الأطوال المحرقية الطويلة وبالنتيجة تكون عوامل التكبير منخفضة.

تكبير المجهر

عـــد إلى الشكل (19–14). افترض أن f_o هو الطول المحرقي للعدسة الجسمية (بالأمتار) وf_e الطول المحرقـــي للعدســـة العينية (بالأمتار). افترض أنه تم وضع العدسة الجسمية والعدسة العينية على طول محور مـــشترك وأنـــه جرى تعيير المسافة بين مركزيهما بحيث تظهر الصورة واضحة. لتكن s تُمثِّل المسافة بين العدسة الجسمية والصورة الحقيقية (بالأمتار) التي تتشكل للجسم قيد الاختبار. يُعطى *التكبير المجهري* (كمية لا بعد لها يُشار لها m في هذا السياق) بالصيغة

$$m = [(s - f_o)/f_o]\,[(f_e + 0.25)/f_e]$$

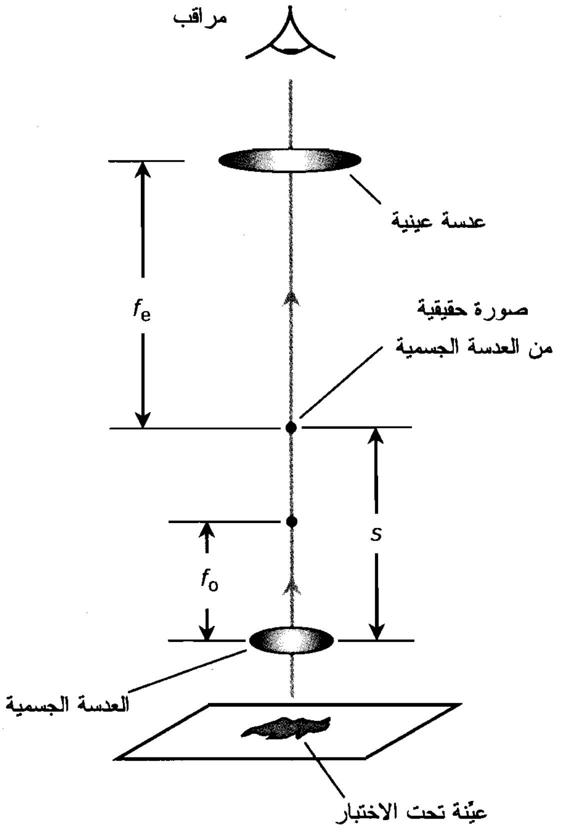
يمـــثل المقدار 0.25 متوسط المسافة الحدية للرؤية الواضحة للعين البشرية وهي *أقرب مسافة* تستطيع العين عندها رؤية الجسم بوضوح وتساوي تقريباً 0.25 m.

تـــتلخص الطريقة الشائعة لحساب تكبير المجهر بضرب تكبير العدسة الجسمية بتكبير العدسة العينية. يجـــري تزويد هذه الأعداد مع العدسات الجسمية والعينية وتعتمد على استخدام الهواء كوسط بين العدسة الجسمية والعدسة العينية، وكذلك على المسافة القياسية بين العدسة الجسمية والعدسة العينية. إذا كانت m_e قوة العدسة العينية وm_o قوة العدسة الجسمية، وبالتالي تكون القوة الكلية m للمجهر

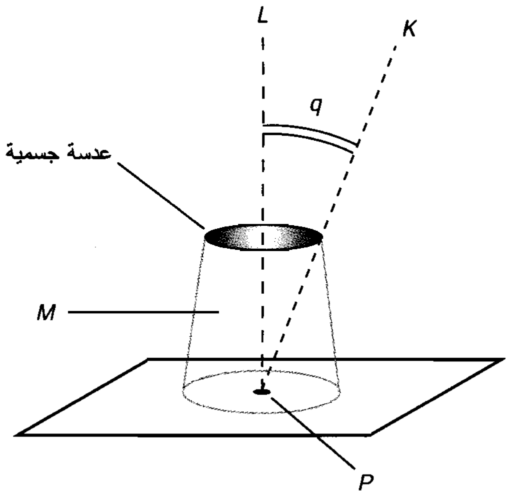
$$m = m_e m_o$$

الدقة والفتحة العددية

تُعتـــبر *الفـــتحة العدديـــة* للعدسة الجسمية في المجهر الضوئي، مواصفة هامة في تحديد الدقة أو مقدار التفصيل الذي يستطيع المجهر إظهاره. يوضح الشكل (19–15) كيفية تحديد ذلك.



الشكل (19-14): حساب عامل التكبير في المجهر المُركَّب. راجع النص للتفاصيل.



الشكل (19-15): تحديد الفتحة العددية للعدسة الجسمية للمجهر. راجع النص للتفاصيل.

ليكن L المستقيم المار من النقطة P في العيِّنة المختبرة/والمار في مركز العدسة العينية أيضاً. ليكن K المستقيم المار في P والذي يتقاطع مع الحرف الخارجي لفتحة العدسة الجسمية. (من المفترض أن يكون الحرف الخارجي دائرياً). ليكن q قياس الزاوية بين المستقيمين L وK. ليكن M الوسط بين العدسة الجسمية والعينة تحت الاختبار. يكون هذا الوسط عادةً الهواء، ولكن ليس دائماً. لتكن r_m قرينة انكسار الوسط M. وبالتالي تُعطى الفتحة العددية للعدسة الجسمية A_o

$$A_o = r_m \sin q$$

في الحالة العامة، كلما كانت قيمة A_o أكبر، كلما كانت الدقة أفضل. توجد ثلاث طرق لزيادة A_o للعدسة الجسمية للمجهر بالنسبة لطول محرقي معطى:

- إمكانية زيادة قطر العدسة الجسمية.
- إمكانية زيادة قيمة r_m.
- إمكانية إنقاص طول موجة ضوء الإنارة.

يكون الطول المحرقي للعدسات الجسمية ذات القطر الكبير صغيراً، وبذلك فهي تُكبِّر بشكل كبير، وهي صعبة البناء. بالنتيجة، عندما يرغب العلماء باختبار جسم بقدر عال من التفصيل، فإنهم يستطيعون استخدام الضوء الأزرق ذي طول الموجة القصير نسبياً. بدلاً من ذلك أو بالإضافة لذلك، يمكن تغيير الوسط M بين العدسة الجسمية والعيِّنة إلى وسط ذي قرينة انكسار عالية، كالزيت الصافي. يُقصِّر ذلك طول موجة الإنارة التي ترتطم بالعدسة الجسمية لأنه يبطئ سرعة الضوء في الوسط M. (تذكر العلاقة بين الاضطراب الكهرطيسي، وطول الموجه، والتردد!) يوجد تأثير جانبي لهذا التكتيك وهو تخفيض التكبير الفعال للعدسة الجسمية، ولكن يمكن تعويض ذلك باستخدام عدسة جسمية بحيث يكون نصف قطر فتحة سطحها صغيراً، أو بزيادة المسافة بين العدسة الجسمية والعدسة العينية.

يقدم استخدام ضوء وحيد اللون بدلاً من الضوء الأبيض فائدة أخرى. يؤثر الزيغ اللوني على الضوء المار في المجهر بالطريقة نفسها التي يؤثر بها على الضوء المار في التلسكوب. لا يحدث الزيغ اللوني إذا كان الضوء وحيد طول الموجة، بالإضافة لذلك، إن استخدام ألوان متنوعة من الضوء أحادية اللون (أحمر أو برتقالي أو أصفر أو أخضر أو أزرق) يؤكد الميزات البنيوية أو التشريحية للعيِّنة التي لا يمكن أن تظهر بشكل جيد دائماً مع اللون الأبيض.

مسألة (8-19)

جرى تحديد قوة العدسة الجسمية للمجهر المُركَّب ×10، بينما حُددت قوة العدسة العينية ×5. ما هو تكبير هذه الآلة m؟

حل (8-19)

اضرب عامل تكبير العدسة الجسمية بعامل تكبير العدسة العينية:

$$m = (5 \times 10) \times = 50\times$$

امتحان موجز

عـــد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. عدسة مُحدَّبة بسيطة يتغيّر طولها المحرقي بشكل طفيف اعتماداً على طول موجة الضوء المار فيها. عند استخدام عدسة كهذه كعدسة جسمية للتلسكوب، يؤدي هذا التأثير إلى
   (a) القزح.
   (b) زيغ كروي.
   (c) زيغ لوني.
   (d) لا شـــيء! المقدمة المنطقية خاطئة. إنّ للعدسة المُحدَّبة الطول المحرقي نفسه بالنسبة لجميع أطوال أمواج الضوء المارة فيها.

2. افترض أن مجهراً يحوي عدسة جسمية طولها المحرقي 1.00 mm، وعدسة عينية طولها المحرقي 25.0 mm. ما هو التكبير؟
   (a) ×25
   (b) ×625
   (c) ×0.0400. هذا الجهاز لا يكبر. إنه يجعل العيِّنة تبدو أصغر.
   (d) نحتاج لمزيد من المعلومات لحساب التكبير.

3. افتـــرض أنه تم غمس لوح من زجاج الكراون، ذي قرينة انكسار 1.52 في ماء قرينة انكساره 1.33. يرتطم شعاع ضوئي يتحرك في الماء بالزجاج بزاوية 45° بالنسبة للناظم ويمر عبر اللوح. ما قيمة الزاوية بالنسبة للناظم والتي سيشكلها الشعاع الضوئي عندما يغادر اللوح ويعاود دخول الماء؟
   (a) 38°
   (b) 54°
   (c) N45°
   (d) لا يـــوجد زاويـــة علـــى الإطلاق! المقدمة المنطقية خاطئة. لن يمر الضوء أبداً من الزجاج. لأنه سينعكس عندما يرتطم بسطح الزجاج.

4. افتـــرض أن الفـــتحة العدديـــة للعدسة الجسمية للمجهر في الهواء تساوي 0.85. وأنه جرى استبدال الوسط بين العدسة والعيِّنة بماء قرينة انكساره 1.33. الفتحة العددية للعدسة الجسمية
   (a) لا تتغير.
   (b) تزداد إلى 1.13.

(c) تنخفض إلى 0.639.

(d) لا يمكن حسابها من هذه المعلومات.

5. وفقاً لقانون الانعكاس

(a) الشعاع الضوئي الذي يمر من وسط قرينة انكساره منخفضة إلى وسط قرينة انكساره مرتفعة فإنه ينعكس على الحد.

(b) الشعاع الضوئي الذي ينتقل من وسط قرينة انكساره عالية إلى وسط قرينة انكساره منخفضة فإنه ينعكس على الحد.

(c) ينعكس الشعاع الضوئي دائماً عن سطح صقيل باتجاه معاكس تماماً لاتجاه وروده.

(d) لا يُعبِّر أي مما سبق عن قانون الانعكاس.

6. يبلغ قطر المرآة الجسمية لتلسكوب عاكس من نمط الكاسغرين 300 mm، ويبلغ الطول المحرقي للعدسة العينية 30 mm. التكبير يساوي

(a) ×100.

(b) ×10.

(c) ×9,000.

(d) يستحيل حساب التكبير من هذه المعلومات.

7. العدسة المُبعِّدة

(a) تستطيع جعل أشعة الضوء المتقاربة متوازية.

(b) تستطيع تركيز الأشعة الشمسية في نقطة لامعة.

(c) تُعرف أيضاً بالعدسة المُحدَّبة.

(d) مثالية للاستخدام كعدسة جسمية في التلسكوب الكاسر.

8. افترض أن سرعة الضوء الأحمر المرئي في وسط شفاف معين 270,000 km/s. ما هي قرينة انكسار هذه المادة تقريباً بالنسبة للضوء الأحمر؟

(a) 0.900

(b) 1.11

(c) 0.810

(d) لا يمكن حسابها من هذه المعلومات.

9. بزيادة تكبير التلسكوب

(a) تنخفض دقة الصورة بتناسب طردي.

(b) يصبح الاستقرار الفيزيائي هاماً أكثر وأكثر.

(c) يزداد سطح تجميع الضوء بتناسب طردي.

(d) يمكن رؤية الأجسام بشكل معتم أكثر وأكثر.

10. مـــا هي الزاوية الحرجة للأشعة الضوئية داخل جوهرة قرينة انكسارها 2.4؟ افترض أن الجوهرة محاطة بالهواء.

(a) 25°

(b) 65°

(c) 67°

(d) 90°

الفصل 20

النظرية النسبية

يوجد مظهران للنظرية النسبية لألبرت أينشتاين: *النظرية الخاصة والنظرية العامة*. تستلزم النظرية الخاصة حركة نسبية، وتستلزم النظرية العامة تسارعاً وجاذبية. ولكن قبل الخوض في غمار النسبية، دعنا نكتشف ماذا ينتج عن افتراض أن سرعة الضوء مطلقة، وثابتة، ونهائية، وأنها أعلى سرعة يمكن أن يبلغها أي جسم.

التزامن

بعدما أصبح مهتماً بالضوء، والفضاء، والزمن، فكر أينشتاين ملياً بنتائج التجارب الموجهة لاكتشاف كيفية تحرك الأرض بالنسبة إلى وسط يُفترض أنه ينقل الأمواج الكهرطيسية كأمواج الضوء المرئي. اعتقد أينشتاين بعدم وجود وسط كهذا وبقدرة أمواج EM على الانتقال في الخلاء الكامل.

الأثير الحامل للضوء

حدد الفيزيائيون في القرن التاسع عشر أن للضوء خصائص موجية، وبأنه يشبه الصوت في بعض الأحيان. ولكن يتحرك الضوء بشكل أسرع من الصوت. ولكن، يمكن أن ينتقل الضوء في الخلاء، بينما لا يستطيع الصوت ذلك. تحتاج الأمواج الصوتية وسطاً مادياً كالهواء أو الماء أو المعدن لتنتشر. فكر معظم العلماء بأنه يجب أن يحتاج الضوء لوسط من نوع ما ولكن ما هو؟ ما الذي يمكن أن يتواجد في كل مكان، حتى في حجرة جرى ضخ كل الهواء منها؟ دُعي هذا الوسط الغامض *بالأثير الحامل للضوء* أو ببساطة *الأثير*. اتضح في نهاية الأمر أنه لا شيء بل مختلق من الخيال.

تساءل العلماء أنه لو وُجد الأثير، كيف يستطيع المرور في كل شيء، حتى في الأرض بكاملها، وكيف يستطيع الدخول في حجرة مخلاة؟ كيف يمكن كشف الأثير؟ تتلخص إحدى الأفكار برؤية إذا كان الأثير "يهب" بعكس دوران الأرض أثناء دوران كوكبنا حول الشمس، وأثناء دوران النظام الشمسي حول مركز مجرة درب التبانة، وأثناء مسير مجرتنا في الكون. إذا وجدت "رياح الأثير"، يجب أن تختلف سرعة الضوء عندها باختلاف الاتجاهات. جرى تعليل ذلك بشكل مشابه للتعليل الذي يجعل المسافر بسرعة على جرار يقيس

سرعة الأمواج الصوتية القادمة من الأمام بشكل أسرع من سرعة الأمواج الصوتية القادمة من الخلف.

في العـــام 1887، نُفِّذت تجربة بواسطة فيزيائيين يسميان ألبرت ميكلسون وإدوارد مورلي في محاولة لاكتـــشاف مـــدى سرعة "رياح الأثير" واتجاه هبوبها. أظهرت *تجربة ميكلسون–مورلي*، كما باتت تُعرف، أن سرعة الضوء تبقى نفسها في جميع الاتجاهات. بث ذلك الشك في نظرية الأثير. إذا وُجد الأثير، بالتالي فإنه يجب أن يتحـــرك مع الأرض وفقاً للنتائج التي تم الحصول عليها بواسطة ميكلسون ومورلي. بدا ذلك مصادفة كبيرة جداً. بُذلت المحاولات لتبرير هذه النتيجة باقتراح أن الأرض تجر الأثير معها. لم يستطع أينشتاين قبول ذلك. لقد استفاد من نتائج تجربة ميكلسون–مورلي. اعتقد أينشتاين بأنه سيكون لتجربة ميكلسون–مورلي النتيجة نفسها لمراقبين على القمر أو على أي كوكب آخر، أو على سفينة فضاء أو في أي مكان من الكون.

سرعة الضوء ثابتة

رفـــض أينشتاين فكرة الأثير الحامل للضوء. واقترح بدلاً منها بديهية: في الخلاء، تكون سرعة انتقال الـــضوء أو ســـرعة انتقال أي حقل كهرطيسي آخر ثابتة مطلقة. وتكون هذه هي الحالة بغض النظر عن حـــركة المـــراقب بالنـــسبة إلى المُزوِّد. (لا تُطبَّق هذه البديهية في وسط آخر غير الخلاء كالزجاج). صمم أينشتاين مسلحاً بهذه البديهية، على استخلاص ما يلي بشكل منطقي.

قـــام أينشتاين بكل عمله باستخدام مزيج من الرياضيات وحلم يقظة سماه "رحلات العقل". لم يكن مجـــرباً بـــل مُنظِّراً. هناك قول في الفيزياء يقول: "يستطيع المجرب إبقاء دزينة من المُنظِّرين مشغولين". قلب أينشتاين هذا القول. لقد أبقت نظرياته آلاف المجربين مشغولين.

لا زمن مطلق

كانـــت إحدى النتائج الأولى لبديهية أينشتاين حول سرعة الضوء هي حقيقة عدم وجود زمن مطلق قياسي. تستحيل مزامنة ساعات مراقبين بحيث يرى كلاهما أن ساعاتهما متوافقة بدقة إذا لم يشغل المراقبان النقطة نفسها تماماً من الفضاء.

بنيـــنا في العقـــود حديثة العهد ساعات ذرية، وادعينا أن دقتها تبلغ جزء من بليون جزء من الثانية (حيث يساوي الجزء من بليون جزء0.000000001 أو 10^{-9}). ولكن يكون لذلك معنى عندما تكون أمام الساعة مباشرة. إذا ابتعدنا عن الساعة لمسافة صغيرة، سيستغرق الضوء (أو أي إشارة أخرى نعرفها) بعض الوقت للوصول إلينا لتصلنا قراءة الساعة.

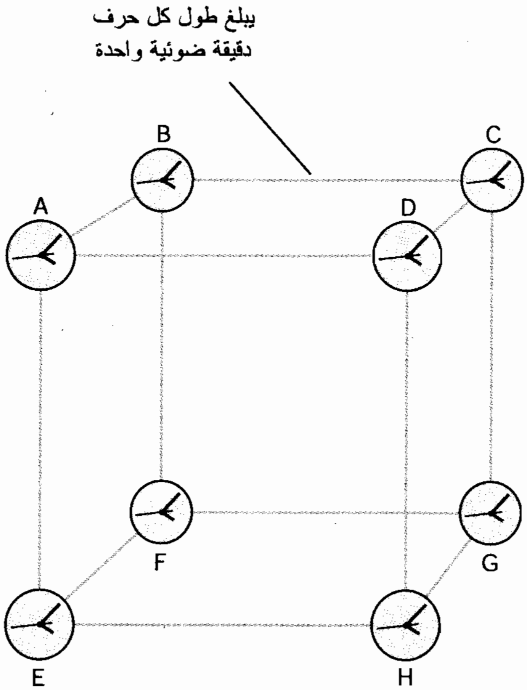
تـــساوي سرعة انتشار الحقل الكهرطيسي، أسرع سرعة معروفة، 3.00×10^{8} m/s (1.86×10^{5} mi/s) تقـــريباً. لذا تنتقل حزمة الضوء بسرعة 300 m (984 ft) تقريباً في زمن قدره 1.00×10^{-6}s (1.00 µs). إذا ابـــتعدت لمسافة أكبر بقليل من طول ملعب كرة القدم عن ساعة ذرية فائقة الدقة والتي تبلغ دقتها جزءاً من بليون جزء من الثانية، سترتكب خطأً في قراءة الساعة بمقدار 1.00 µs. إذا انتقلت للجانب الآخر من العالم، حيث يجب أن تنتقل الإشارة الراديوية من الساعة مسافة 20.000 km (12,500 mi) لتصلك، سيكون

الخطـــأ في قراءة الزمن 0.067 s. لو ذهبت للقمر، والذي يبعد 4.0×10^5 km (2.5×10^5 mi)، سيكون الخطأ في قراءة الساعة 1.3 s تقريباً.

إذا اكتشف العلماء في أي وقت حقل طاقة يستطيع الانتقال في الفضاء آنياً بغض النظر عن المسافة، سيُحل بالتالي لغز الزمن المطلق. ولكن في السيناريوهات العملية، فإن سرعة الضوء هي أسرع سرعة ممكنة. (تقتـــرح بعض التجارب الحديثة بأن تأثيرات معينة تستطيع الانتشار بشكل أسرع من سرعة الضوء خلال مـــسافات قصيرة، ولكن لم يتمكن أحد من إثبات ذلك على نطاق واسع حتى الآن. يستخدم قلة تأثيرات كهـــذه لإرســـال أي معلومات كالبيانات من ساعة ذرية). نستطيع أن نقول إن سرعة الضوء هي سرعة الزمن. المسافة والزمن مرتبطان بشكل لا ينفصم.

وجهة نظر

افترض وجود ثمان ساعات مُرتبة على رؤوس مكعب ضخم. وافترض أنه يبلغ طول كل حرف من حروف المكعب دقيقة ضوئية أو 1.8×10^7 km (1.1×10^7 mi) تقريباً، كما هو موضح في الشكل (20-1). نحن أمام تحد: مزامنة الساعات بحيث تتوافق ضمن حدود الرؤية، ولنقل 1 ثانية في كل منها. هل تعتقد أن ذلك سيكونُ سهلاً؟



الشكل (20-1): مجموعة افتراضية مُكوَّنة من ثمان ساعات موضوعة في رؤوس مكعب طول حرفه دقيقة ضوئية، كيف ستجري مزامنة هذه الساعات؟

بمـــا أن الـــساعات متـــباعدة جداً عن بعضها، فإن الطريقة الوحيدة للتحقق مما نقوله هي بتزويدها بمرسلات راديوية ترسل إشارات الزمن. بدلاً من ذلك، إذا كان لدينا تلسكوب قوي بشكل كاف، بحيث نستطيع مراقبتها وقراءتها مباشرة بالنظر. تنتقل المعلومات التي تخبرنا عن الساعة في أي من الحالتين، بسرعة الـــضوء. ســـتدخل سفينة فضاء وتناور بحيث تكون في مركز المكعب، على مسافة متساوية من الساعات الـــثماني. ثم نمـــضي في مزامنة الساعات باستخدام التحكم عن بعد، باستخدام معدات اتصالات لاسلكية ببـــيانات ثنائية المسار. اشكر السماء على الكمبيوترات! أُنجزت المهمة في بضع دقائق فقط. لا يمكن القيام بذلك آنياً بالطبع، لأن إشارات التحكم تستغرق في أحسن الأحوال دقيقة للوصول إلى الساعات من موقعنا المركـــزي، ثم ستـــستغرق عودة الإشارات من الساعات الزمن نفسه لتخبرنا عن الساعة. ولكن بعد قليل سيكون كل شيء في حالة توافق. تشير الساعات من A إلى H إلى الزمن نفسه خلال جزء من الثانية.

اقتناعاً بعملنا، طفنا في المكعب ونظرنا مرة أخرى للساعات. فماذا نرى؟ الساعات غير متزامنة. عدنا بـــسفينتنا إلى مركـــز المكعب لتصحيح المشكلة. ولكن عندما وصلنا هناك، لا يوجد مشكلة لنصححها! الساعات في حالة توافق مرة أخرى.

يمكـــنك تخمين ما يحدث هنا. تعتمد قراءات الساعة على مدى سرعة انتقال الإشارات كي تصلنا. بالنسبة لمراقب في مركز المكعب، تصل الإشارات من الساعات الثماني، من A حتى H، من المسافة نفسها تماماً. ولكن، ذلك ليس صحيحاً بالنسبة لأي نقطة أخرى في الفضاء. بالنتيجة، يمكن مزامنة الساعات من تلك النقطة المفضلة فقط؛ إذا ذهبنا لأي مكان آخر، علينا مزامنتها جميعها مرة أخرى. يمكن القيام بذلك، ولكن ستجري مزامنة الساعات عندما نراقبها من نقطة ذات أفضلية. يوجد نقطة تزامن وحيدة -نقطة من الفضاء تكون قراءات الساعات الثماني منها نفسها- لكل إحداثي للساعات.

لا توجد نقطة تزامن أكثر شرعية من أي نقطة أخرى من وجهة نظر علمية. لو حدث وكان المكعب مـــستقراً بالنـــسبة لـــنقطة مرجعية مُفضّلة كالأرض، يمكننا مزامنة الساعات، للملاءمة، من تلك النقطة المرجعية. ولكن، إذا كان المكعب يتحرك بالنسبة لإطارنا المرجعي، فإننا لن نكون قادرين أبداً على الحفاظ علـــى الـــساعات متـــزامنة. يعتمد الزمن على مكاننا وعلى حركتنا بالنسبة لأي جهاز نستخدمه للإشارة للزمن. الزمن ليس مطلقاً، بل إنه نسبي، ولا انتشار له.

مسألة (20-1)

افتـــرض أنه توجد ساعة ذرية على القمر (الساعة M)، وأنه يجري إرسال إشاراتها الزمنية بواسطة مُرســـل راديـــوي قوي. تم ضبط هذه الساعة بدقة لتتوافق مع ساعة ذرية أخرى في مدينتك على الأرض (الـــساعة E)، وتم تجهيـــزها بمرسل راديوي. إذا انتقلت إلى القمر، ماذا ستكون القراءات النسبية لهاتين الساعتين، وذلك من خلال تحديدها بالاستماع إلى الإشارات الراديوية؟

حل (20-1)

تنـــتقل الإشارات الراديوية في الفضاء بسرعة 3.00×10^5 km/s. يبعد القمر حوالى 4.0×10^5 km

أو 1.3 ثانية ضوئية عن الأرض. ستنـــزاح قراءة الساعة M 1.3s تقريباً للأمام في الزمن (أي أبكر) نتـــيجة حذف التباطؤ الزمني للإشارة حتى تصلك. ستنـــزاح قراءة الساعة E حوالى 1.3s للخلف في الزمن (أي لاحقاً) بسبب دخول التباطؤ الزمني الذي لم يكن موجوداً حيث كنت. عند وصولك القمر، ستكون الساعة M متقدمة على الساعة E بمقدار 2.6s تقريباً.

تمدد الزمن

يؤثـــر الوضع النسبي للمراقب في الفضاء على القراءات النسبية للساعات الموضوعة في نقاط مختلفة. وبشكل مشابه، تؤثر الحركة النسبية في الفضاء على المعدل الظاهري "لجريان" الزمن. افترض اسحق نيوتن أن الزمن يجري بأسلوب مطلق وأنه يشكل ثابتاً أساسياً في الكون. وضّح أينشتاين أن ذلك ليس صحيحاً؛ إنهـــا سرعة الضوء الثابتة وليس الزمن. دعنا نقوم "بتجربة عقلية" بهدف فهم سبب حدوث *التمدد النسبي للزمن* اعتماداً على فرضية أينشتاين.

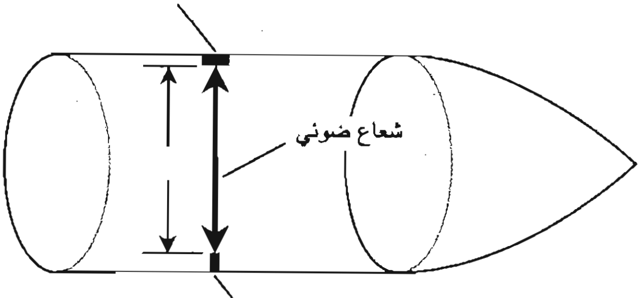
الساعة الليزرية

افتـــرض أنه لدينا سفينة فضائية مجهزة بليزر/حساس على جدار، ومرآة على الجدار المقابل (الشكل (20-2)). تخيل أنه تم وضع ليزر/حساس والمرآة بحيث ينتقل الشعاع الضوئي من الليزر عامودياً على محور الـــسفينة، وعامودياً على جدرانها، و(حالما تتحرك السفينة) عامودياً على اتجاه حركتها. تمت معايرة الليزر والمرآة بحيث يفصل بينهما مسافة 3.00 m. بما أن سرعة الضوء في الهواء 3.00×10^{8} m/s تقريباً، يستغرق الـــشعاع الـــضوئي 1.00×10^{-8} s أو 10.0 نانـــو ثانية (10.0 ns)، ليقطع السفينة من الليزر إلى المرآة ويـــستغرق 10.0 ns أخـــرى لـــيعود الـــشعاع إلى الحساس. يحتاج الشعاع إذاً إلى 20.0 ns لينتقل من ليزر/حساس إلى المرآة ويعود ثانية.

يصدر ليزرنا نبضات مدها بالغة الصغر، وأقصر بكثير من الزمن الذي تحتاجه الحزمة لتقطع السفينة. ربما علينا حتى أن نفترض أن الليزر يصدر بضعة فوتونات في كل رشقة! نقيس تزايد الزمن باستخدام راسم اهتزاز بالغ التعقيد بحيث نستطيع مراقبة النبضات الصادرة والواردة، وقياس الفارق الزمني بينهما. إنها ساعة خاصـــة؛ تعـــتمد قدرتها في مجاراة الزمن على سرعة الضوء، والتي افترض أينشتاين أنها ثابتة أياً تكن نقطة المراقبة التي تجري عملية المراقبة منها. لا توجد طريقة لمجاراة الزمن.

استقرار الساعة

افترض أننا أقلعنا محركات السفينة وانطلقنا. وأننا أسرعنا وهدفنا النهائي بلوغ سرعة قريبة من سرعة الـــضوء. افترض أننا أسرعنا حتى بلغنا جزءاً كبيراً من سرعة الضوء، ثم أوقفنا تشغيل المحركات بحيث نبحر في الفـــضاء. قد تسأل "بالنسبة لماذا نحن نتحرك؟" إنه سؤال هام كما سنرى! لحد الآن، افترض أننا نقيس السرعة بالنسبة للأرض.



الشكل (20–2): سفينة فضاء مجهزة بساعة ليزرية. هذا ما سيراه المراقب دائماً في السفينة.

نقيس الزمن الذي يستغرقه الليزر لعبور السفينة والعودة ثانية. نقود السفينة مع الليزر، والمرآة، وجميع وسائل الرفاهية في سفينة الفضاء الصغيرة. نجد أن الفارق الزمني لا يزال نفسه تماماً عندما لم تكن السفينة تتحرك بالنسبة للأرض؛ يستمر راسم الاهتزاز بإظهار تأخير 20.0 ns. ينتج ذلك مباشرة من بديهية أينشتاين. سرعة الضوء لم تتغيّر لأنها لا تستطيع أن تتغير. لم تتغيّر المسافة بين الليزر والمرآة كذلك، لذلك استغرقت الرحلة الطول الزمني نفسه الذي استغرقته قبل تحرك السفينة.

إذا أسرعنا بحيث تبلغ سرعة السفينة 60 بالمائة من سرعة الضوء، ثم 70 بالمائة، وفي النهاية 99 بالمائة من سرعة الضوء، سيبقى الفاصل الزمني 20.0 ns دائماً مقاساً من إطار مرجعي أو من نقطة مراقبة تقع داخل السفينة.

دعنا في هذه النقطة نضيف بديهية إلى بديهية أينشتاين: في الفضاء الحر، تتبع حزم الضوء دائماً أقصر مسافة ممكنة. إنه بشكل طبيعي خط مستقيم. أنت تسأل، "كيف يمكن لأقصر مسار بين نقطتين في الفضاء أن يكون أي شيء آخر غير الخط المستقيم؟" إنه سؤال جيد آخر. سنعالج ذلك لاحقاً في هذا الفصل. سجّل لحد الآن أن حزم الضوء تظهر على أنها تتبع خطوطاً مستقيمة في الفضاء الحر إذا لم يكن المراقب متسارعاً بالنسبة لمُزوِّد الضوء.

الساعة في حالة حركة

تخيل الآن أننا خارج المركبة وأننا عدنا إلى الأرض. وتخيل أننا مجهزون بتلسكوب خاص يسمح لنا برؤية السفينة من الداخل عند انطلاقها بسرعة تبلغ جزءاً كبيراً من سرعة الضوء. نستطيع أن نرى الليزر، والمرآة، وحتى حزمة الليزر نفسها لأن ساكني مركبة الفضاء قد قاموا بملئها مؤقتاً بالدخان لتسهيل الرؤية بالنسبة لنا. (إنهم يرتدون بدلات الفضاء وبالتالي يستطيعون التنفس).

يوضح الشكل (20–3) ما نراه. تستمر حزمة الليزر بالانتقال في خطوط مستقيمة، وتستمر بالانتقال بسرعة 3.00×10^{8} m/s بالنسبة لنا. إن ذلك صحيح بسبب بديهية أينشتاين المتعلقة بسرعة الضوء وحقيقة

أن أشـــعة الضوء تظهر دائماً وكأنها تنتقل في خطوط مستقيمة إذا لم نكن نسرع. ولكن، على الأشعة أن تنتقل لمسافة أكبر من 3.00 m لتعبر السفينة. تحركت السفينة بسرعة كبيرة بحيث وصل شعاع الضوء من الليـــزر إلى المرآة في الوقت المناسب، وانتقلت السفينة مسافة هائلة للأمام. يحدث الشيء نفسه عندما يعود الشعاع إلى الحساس من المرآة. كنتيجة لذلك، سيبدو لنا، نحن الذين نراقب السفينة من الأرض، أن حزمة الليزر قد استغرقت زمناً أكبر من 20.0 ns لتقطع السفينة وتعود.

بـــتقدم السفينة، يظهر الزمن وكأنه يتباطأ داخلها، كما تُرى من نقطة مراقبة "ثابتة". ولكن يتحرك الزمن داخل السفينة بسرعة طبيعية. كلما ازدادت سرعة السفينة، كلما كان التعارض أكبر. باقتراب سرعة الـــسفينة من سرعة الضوء، يمكن أن يصبح *عامل تمدد الزمن* كبيراً حقاً؛ نظرياً لا توجد نهاية لمقدار كبره. يمكنك تصور ذلك بتخيل الشكل (20-3) وقد تمدد أفقياً بحيث يجب على الأشعة الضوئية الانتقال بشكل موازٍ تقريباً لاتجاه الحركة، كما تُرى من إطار مرجعي "مستقر".

صيغة للتمدد الزمني

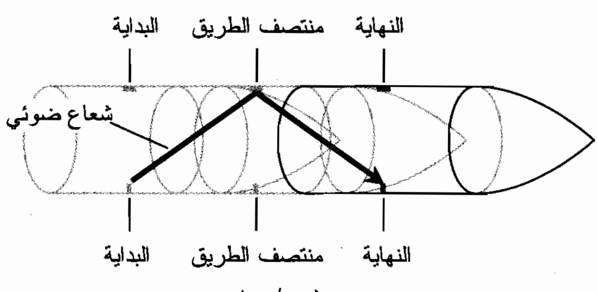
تـــوجد علاقـــة رياضـــية بين سرعة مركبة الفضاء في "تجربة العقل" السابقة ومدى التمدد الزمني. لـــيكن t_{ship} عـــدد الـــثواني الذي يظهر أنها تنقضي في السفينة المتحركة بانقضاء 1 s بدقة مقاسة بواسطة الـــساعة المقابلـــة عندما نجلس في مرصدنا على الأرض. ولتكن u سرعة السفينة كجزء من سرعة الضوء. بالتالي

$$t_{\text{ship}} = (1 - u^2)^{1/2}$$

إن عامل التمدد الزمني (يدعى k) هو مقلوب القيمة السابقة؛ أي

$$k = 1/[(1 - u^2)^{1/2}]$$
$$= (1 - u^2)^{-1/2}$$

يُمثّل العدد 1 في هذه الصيغ، قيمة دقيقة رياضياً وهو جيد لأي عدد من الأرقام الهامة.



الشكل (20-3): هذا ما يراه المراقب الخارجي عندما تنطلق مركبة الفضاء المجهزة بساعة ليزرية بسرعة تبلغ جزءاً كبيراً من سرعة الضوء.

دعـــنا نرى مدى ضخامة عامل التمدد الزمني إذا كانت السفينة تتحرك بسرعة 1.50×10^8 m/s. في هذه الحالة، $u = 0.500$. إذا مر 1.00 s على الأرض، وبالتالي وفقاً لمراقب أرضي،

$$t_{ship} = (1.00 - 0.500^2)^{1/2}$$
$$= (1.00 - 0.250)^{1/2}$$
$$= 0.750^{1/2}$$
$$= 0.866 \text{ s}$$

أي ســـيبدو أنه مرّ 0.866 s على السفينة بمرور 1.00 s عند قياسها من نقطة مراقبة على الأرض. ذلك يعني أن عامل التمدد الزمني يساوي 1.00/0.866 أو 1.15 تقريباً. سيبدو الزمن على المركبة بالطبع، وكأنه "يجري" بشكل طبيعي.

دعنا نرى للتسلية فقط ما سيحدث إذا سارت المركبة بسرعة 2.97×10^8 m/s. في هذه الحالة، s = 0.990. إذا مر 1.00 s على الأرض، وبالتالي كمراقب أرضي، سنرى ذلك:

$$t_{\text{ship}} = (1.00 - 0.990^2)^{1/2}$$
$$= (1.00 - 0.98)^{1/2}$$
$$= 0.0200^{1/2}$$
$$= 0.141 \text{ s}$$

أي ســـيبدو أنه مر 0.141 s على السفينة بمرور 1.00 s على الأرض. يبلغ عامل التمدد الزمني k في هذه الحالة 1.00/0.141 أو 7.09 تقريباً. "يجري" الزمن أبطأ سبع مرات على المركبة المتحركة بسرعة 99 بالمائة من سرعة الضوء من جريانه على الأرض؛ من الإطار الزمني لشخص ما على الأرض.

كمـــا ترى، يشير ذلك إلى السفر في الزمن. وفقاً للنظرية النسبية الخاصة، إذا استطعت الدخول إلى سفينة فضاء والانتقال بسرعة كافية لمسافة كافية، يمكنك السفر إلى المستقبل. قد تسافر إلى نجم بعيد وتعود إلى الأرض خـــلال مـــا يبدو لك بضعة أشهر، وتجد نفسك أنك في السنة 5000 بعد الميلاد. حقق كُتّاب الخيال العلمي ذلك في بداية القرن العشرين بعدما نشر أينشتاين عمله، وكان منجم ثراء لهم.

مسألة (20-2)

لمـــاذا لا نلاحظ التمدد الزمني النسبي في الرحلات القصيرة بالسيارة أو بالقطار أو بالطائرة؟ فعندما نهبط تبقى الساعات متزامنة (باستثناء الاختلافات بين المناطق الزمنية في بعض الحالات).

حل (20-2)

يـــوجد تمـــدد زمني نظرياً. ولكن، الفرق صغير جداً بحيث لا نلاحظه. يكون عامل التمدد الزمني صـــغيراً جداً إذا لم تنتقل المركبة بسرعة تبلغ جزءاً كبيراً من سرعة الضوء. لا يمكن قياس تأثيره في الـــسرعات الطبيعية إذا لم تُستخدم ساعات ذرية دقيقة تبلغ دقتها جزءاً بالغ الصغر من 1 s، لقياس الزمن في كلا الإطارين المرجعيين.

مسألة (20–3)

ما هي السرعة اللازمة لإنتاج عامل تمدد زمني $k = 2.00$؟

حل (20–3)

استخدم صيغة التمدد الزمني، ودع u مجهولة. وبالتالي يمكن إيجاد u، خطوة بخطوة، بهذه الطريقة:

$$k = (1 - u^2)^{-1/2}$$

$$2.00 = (1 - u^2)^{-1/2}$$

$$0.500 = (1 - u^2)^{1/2}$$

$$0.250 = 1 - u^2$$

$$-0.750 = -u^2$$

$$u^2 = 0.750$$

$$u = (0.750)^{1/2} = 0.866$$

أي تبلغ السرعة 86.6 بالمائة من سرعة الضوء أو 2.60×10^8 m/s.

التشوه الفضائي

تظهر الأجسام نتيجة السرعات النسبية–أي السرعات العالية كفاية لإحداث تمدد زمني كبير– مقلصة في اتجاه حركتها. كما في التمدد الزمني، يحدث *التشوه الفضائي النسبي* فقط عندما نراقب من نقطة المراقبة جسماً يتحرك بسرعة تبلغ جزءاً ضخماً من سرعة الضوء.

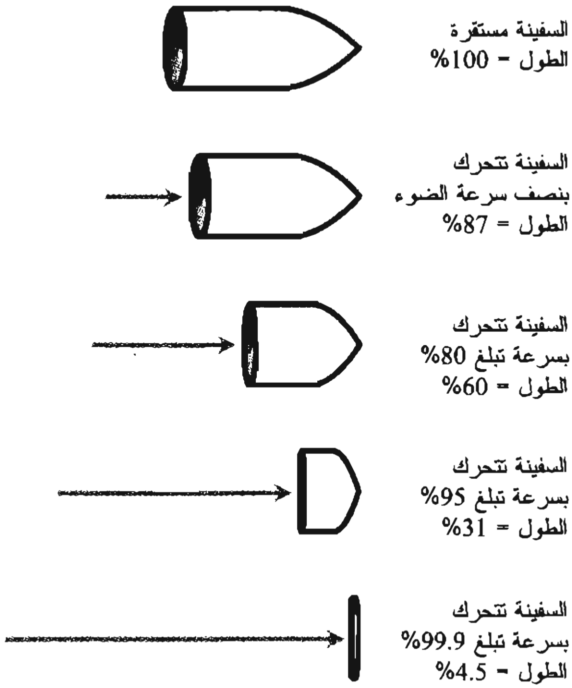
وجهة نظر: الطول

إذا سافرنا في سفينة فضاء، يظهر كل شيء، وبغض النظر عن سرعته، طبيعياً ما دامت سفينتنا لا تتسارع. يمكننا أن نطوف بسرعة تبلغ 99.9 بالمائة من سرعة الضوء بالنسبة إلى الأرض، ولكن إذا كنا داخل سفينة فضاء، ستكون السفينة دائماً مستقرة بالنسبة لنا. يظهر الزمن، والفضاء، والكتلة بشكل طبيعي من نقطة مراقبة متعلقة بالمسافرين في رحلة فضائية نسبية. ولكن، أثناء مراقبتنا لسفينة فضاء تبحر من نقطة مفضلة على الأرض، يتناقص طولها بزيادة سرعتها. ولا يتأثر قطرها. إن مدى تقلص الطول هو مدى تباطؤ الزمن نفسه.

ليكن L الطول الظاهري للمركبة المتحركة كجزء من طولها عندما تكون متوقفة بالنسبة لمراقب. لتكن u سرعة السفينة كجزء من سرعة الضوء. بالتالي

$$L = (1 - u^2)^{1/2}$$

يوضح الشكل (20–4) هذا التأثير بالنسبة لسرعات أمامية نسبية مختلفة. يحدث التقلص بشكل كلي في اتجاه الحركة. يُنتج ذلك تشوهاً فيزيائياً ظاهرياً في المركبة وفي كل شيء داخلها، متضمناً المسافرين. إنه نوع يشبه المرايا الموجودة في دور التسلية والتي تتقعر ببعد واحد فقط وتعكس صورتك "المتقلصة". يقترب الطول الذي تجري مراقبته من الصفر، باقتراب سرعة المركبة من سرعة الضوء.



الشكل (20-4): بزيادة سرعة الجسم بشكل أسرع وأسرع، يصبح الجسم أصغر وأصغر على طول محور حركته.

افتراضات وتحذيرات

إنها ظاهرة غريبة. قد تتساءل، اعتماداً على هذه النتيجة، عن أشكال الفوتونات، وعن الجُسيْمات التي يتكون منها الضوء المرئي وجميع أشكال الإشعاع الكهرطيسي الأخرى. تتحرك الفوتونات بسرعة الضوء. هل يعني أنها أقراص مسطحة أو مربعات أو مثلثات رفيعة بشكل لا نهائي تندفع بعنف بشكل جانبي في الفضاء؟ لم يـــرَ أحد أبداً الفوتون، وبالتالي لا يعلم أحد شكله. من الممتع الافتراض أن الفوتونات عبارة عن أشياء ثنائية الأبعاد وأن حجمها صفر. ولكن، إذا كان حجمها صفراً، فكيف نستطيع أن نقول إنها موجودة؟

يعلـــم العلماء الكثير عمّا يحدث للأجسام عندما تقترب سرعتها من سرعة الضوء، ولكن لا يجب أن نبالغ وأن نقول ماذا سيحدث لو تمكنت مادة ما من بلوغ سرعة الضوء. سنرى باختصار أنه لا يستطيع أي جـــسم فيزيائي (مثل سفينة فضاء) بلوغ سرعة الضوء، وبالتالي فإن فكرة انضغاط الجسم الحقيقي ليصبح بـــسماكة صـــفرية ليـــست أكثـــر مـــن مجرد خيال أكاديمي. إن مقارنة الفوتونات، بالجُسيْمات المادية كالرصاصـــات أو كرات البيسبول هي قفزة بديهية غير مُفسَّرة. إننا لا نستطيع جعل الفوتون ساكناً، ولا نـــستطيع إطلاق رصاصة أو رمي كرة بيسبول بسرعة الضوء. ولكن نستطيع القول إن "كرات البيسبول والفوتونات لا تُمثّل الكائنات نفسها".

مسألة (20-4)

افترض أن طول سفينة فضاء 19.5 m في حالة السكون. ما هو الطول الذي ستبدو به إذا اندفعت بسرعة 2.40×10^8 m/s؟

حل (20-4)

أولاً، حوِّل السرعة إلى جزء من سرعة الضوء وسمِّ هذا الجزء u:

$$u = (2.40 \times 10^8)/(3.00 \times 10^8)$$
$$= 0.800$$

ثم استخدم صيغة التشوه الفضائي لإيجاد L، الذي يُمثِّل جزءاً من طول السفينة في حالة السكون.

$$L = (1 - u^2)^{1/2}$$
$$= (1 - 0.800^2)^{1/2}$$
$$= (1 - 0.640)^{1/2}$$
$$= 0.360^{1/2}$$
$$= 0.600$$

أخيراً، اضرب الطول السكوني للسفينة 19.5 m بالعدد 0.600 لتحصل على 11.7 m وهو الطول الذي ستظهر به المركبة عندما تنطلق بسرعة 2.40×10^8 m/s.

تشوه الكتلة

يشكل تزايد كتل الأجسام عند تحركها بشكل أسرع وأسرع تأثيراً هاماً آخر للسرعات النسبية. يكون مدى تزايد الطول مساوياً لمدى تناقصه ولمدى تباطؤ الزمن.

وجهة نظر: الكتلة

إذا سافرنا داخل مركبة فضاء، بغض النظر عن السرعة، ستظهر جميع الكتل في السفينة طبيعية بالنسبة لنا طالما أن سفينتنا غير متسارعة. ولكن، ومن نقطة ذات أفضلية على الأرض، تزداد كتلة السفينة وكتل جميع الذرات داخلها بزيادة السرعة.

لتكن m كتلة السفينة المتحركة كمضاعف لكتلتها عندما تكون مستقرة بالنسبة للمراقب. لتكن u سرعة السفينة كجزء من سرعة الضوء. إذاً

$$m = 1/(1 - u^2)^{1/2}$$
$$= (1 - u^2)^{-1/2}$$

إنه العامل k نفسه الذي عرّفناه منذ مدة قصيرة. إنه دائماً أكبر أو يساوي 1.

انظـــر ثانية إلى الشكل (20–4). عندما تتحرك السفينة بشكل أسرع فإنها "تتقلص". تخيل الآن أنها أصبحت أكثر ضخامة. إن المزج بين الحجم الأصغر والكتلة الأكبر "يُضاعف" كثافة السفينة.

افتـــرض أن الكـــتلة السكونية لسفينتنا (الكتلة في حالة الثبات) تساوي 10 طن متري. عندما تسير بسرعة تساوي نصف سرعة الضوء، تزداد كتلتها إلى أكثر من 11 طن متري بقليل. عندما تصبح سرعتها 80 بالمائة من سرعة الضوء، تصبح كتلتها 17 طن متري تقريباً. عندما تصبح سرعتها 95 بالمائة من سرعة الـــضوء، تـــزن السفينة حوالى 32 طناً مترياً. وعندما تصبح سرعة السفينة 99.9 بالمائة من سرعة الضوء، تصبح كتلة السفينة أكثر من 220 طناً مترياً. وهكذا إلى اللانهاية. باقتراب سرعة السفينة من سرعة الضوء، تزداد كتلتها أكثر وأكثر دون نهاية.

السرعة محدودة ذاتياً

مـــن المغـــري الافتراض بأن كتلة جسم ستصبح لا نهائية إذا استطعنا تسريعه إلى سرعة تبلغ سرعة الـــضوء. في النهاية، باقتراب u من 1 (أو 100 بالمائة)، تزداد قيمة m في الصيغة السابقة دون نهاية. ولكن، هـــناك أمر حول ما يحدث عند اقتراب ظاهرة مقاسة أو خاصة من نهاية ما؛ إنها مسألة أخرى أن نتحدث عمّا يحدث عند بلوغ النهاية وذلك على افتراض إمكانية بلوغها.

لم يـــرَ أحـــد الفوتون في حالة سكون. ولم يرَ أحد سفينة فضاء تتحرك بسرعة الضوء. لا يوجد أي كمـــية محـــدودة من الطاقة تستطيع جعل أي جسم حقيقي يتسارع إلى سرعة الضوء، وذلك بسبب زيادة الكتلة النسبية التي تمنع ذلك. حتى لو كان ذلك ممكناً، سيكون عامل زيادة الكتلة، كما هو مُحدد بالصيغة الـــسابقة، عـــديم المعـــنى. علينا التقسيم على صفر لحساب ذلك. والقسمة على صفر عملية غير معرَّفة في الرياضيات.

كلما أصبحت سفينة الفضاء السريعة أكبر كتلة، كلما أصبح الصاروخ الدافع اللازم لتسريع السفينة أقوى. عندما تقترب سرعة سفينة الفضاء من سرعة الضوء، تصبح كتلتها هائلة. يجعل ذلك إعطاءها المزيد مـــن السرعة أصعب وأصعب. أثبت الفلكيون والفيزيائيون باستخدام الحساب التكاملي عدم وجود كمية محدودة من الطاقة تستطيع دفع سفينة فضاء بسرعة الضوء.

الجُسيْمات عالية السرعة

سمعـــت بعـــبارات مثل *الكتلة السكونية للإلكترون*، والتي تشير إلى كتلة الإلكترون عندما لا يتحرك بالنسبة للمراقب. عند انطلاق الإلكترون الذي تجري مراقبته بسرعة نسبية، فإنه يمتلك كتلة أكبر من كتلته السكونية وبالتالي سيمتلك قوة وطاقة حركية أكبر مما يُشار له في الصيغ المستخدمة في الفيزياء التقليدية. إن هـــذه الحقيقة، وبشكل مغاير للتشوه الفضائي، هي أكثر من مجرد وقود "للتجارب العقلية". عندما تتحرك الإلكترونات بسرعة كبيرة كافية، فإنها تنال خصائص جُسيْمات أكبر كتلة وتكتسب بعض خصائص أشعة x وأشـــعة غامـــا الصادرة من المواد المشعة. يوجد اسم للإلكترونات عالية السرعة التي تتصرف وفق هذه الطريقة: *جُسيْمات بيتا*.

يستفيد الفيزيائيون من التأثيرات النسبية على كتل البروتونات، والهليوم، والنيترونات، والجُسيْمات الذرية الجزئية الأخرى. عند تعريض هذه الجُسيْمات لحقول مغنطيسية وكهربائية قوية في جهاز يدعى *مُسرِّع الجُسيْمات*، فإنها تتحرك بسرعة كبيرة بحيث تزداد كتلتها بسبب التأثيرات النسبية. عندما ترتطم الجُسيْمات بذرات المادة، تتحطم نوى الذرات الهدف. يمكن عند حدوث ذلك، إطلاق الطاقة على شكل أشعة تحت حمراء (IR)، وضوء مرئي، وأشعة فوق بنفسجية (UV)، وأشعة x، وأشعة غاما، وكذلك على شكل خليط من الجُسيْمات الجزئية.

إذا سافر رواد الفضاء في وقت ما لمسافات طويلة في الفضاء في سفن تتحرك بسرعات قريبة من سرعة الضوء، ستكون زيادة الكتلة النسبية مفهوماً عملياً. بينما لن تبدو أجسامهم أكثر كتلة وذلك إذا راقبناها من نقطة مراقبة مرتبطة بهم حيث ستظهر الأشياء داخل السفينة طبيعية بالنسبة لهم، ولكنها ستصبح إذا راقبناها من نقطة مراقبة خارجية أكثر كتلة في الحقيقة وستشكل مسألة خطيرة. من المروع جداً التفكير بشأن ما سيحدث عند ارتطام مُذنَّب يزن 1kg بسفينة فضاء تتحرك بسرعة 99.9 بالمائة من سرعة الضوء. ولكن، ذلك الحجر الذي يبلغ وزنه 1kg سيزن أكثر من 22 kg عندما تكون $u = 0.999$. بالإضافة لذلك، سترتطم كل ذرة خارج السفينة "بمقدمة" المركبة بسرعة نسبية، منتجةً إشعاعاً قاتلاً من النوع نفسه الذي يحدث في مُسرِّعات الجُسيْمات عالية الطاقة.

التحقق التجريبي

تم قياس تمدد الزمن النسبي وزيادة الكتلة تحت شروط مُتحكَّم بها، وتوافقت النتائج مع صيغ أينشتاين التي صرح عنها سابقاً. لذلك فإن هذه التأثيرات هي أكثر من مجرد خدع للخيال.

لقياس التمدد الزمني، تم وضع ساعة ذرية فائقة الدقة على متن طائرة، وتم إرسالها لتطوف في رحلة جوية لمدة بسرعة بلغت بضع مئات من الكيلومترات بالساعة. أُبقيت ساعة ذرية أخرى في المكان الذي أقلعت منه الطائرة وهبطت فيه. على الرغم من أن سرعة الطائرة كانت تساوي جزءاً طفيفاً فقط من سرعة الضوء، وعلى الرغم من أن التمدد الزمني الناتج كان صغيراً جداً، إلا أنه كان كبيراً بدرجة كافية لقياسه. عندما عادت الطائرة إلى المحطة الأخيرة، تمت مقارنة الساعات التي تمت مزامنتها قبل بدء الرحلة (بعد وضعهما بجانب بعضهما البعض، بالطبع). سجلت الساعة التي تم وضعها في الطائرة توقيتاً أبكر قليلاً من توقيت الساعة التي بقيت ساكنة على الأرض.

لقياس الزيادة في الكتلة، نستخدم مُسرِّعات الجُسيْمات. يمكن تحديد كتلة الجُسيْم المتحرك اعتماداً على كتلته السكونية المعروفة وعلى طاقته الحركية التي يملكها بانتقاله. عند إجراء الحسابات الرياضية تبين أن صيغة أينشتاين صحيحة دائماً.

مسألة (20-5)

افترض أن مذنباً صغيراً يزن 300 ميلي غرام (300 mg) يرتطم بغلاف مركبة فضائية تتحرك بسرعة 99.9 بالمائة من سرعة الضوء. ما هي الكتلة الظاهرية للمُذنَّب؟

حل (20-5)

اســتخدم الصيغة السابقة لحساب الزيادة في الكتلة النسبية، اعتبر أن $u = 0.999$. ثم اضرب الكتلة بالعامل m كما يلي:

$$\begin{aligned} m &= (1 - 0.999^2)^{-1/2} \\ &= (1 - 0.998)^{-1/2} \\ &= 0.002^{-1/2} \\ &= 1/(0.002)^{1/2} \\ &= 1/0.0447 \\ &= 22.4 \end{aligned}$$

تبلغ كتلة المُذنَّب عندما يرتطم بالمركبة 300×22.4 mg أو 6.72 g.

النسبية العامة

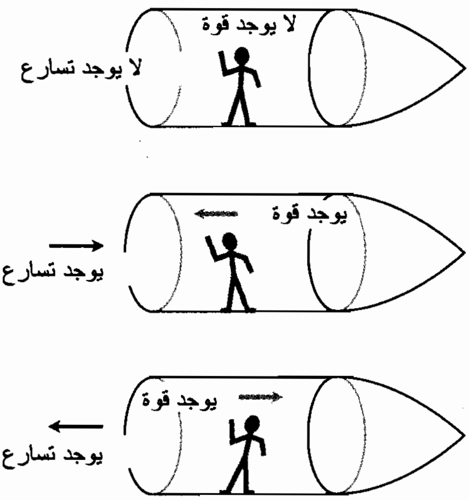
لا يوجد مقياس للموضع في الكون، ولا يوجد مقياس مطلق لشعاع السرعة. الطريقة الأخرى لقول ذلــك هــي أن أي إطار مرجعي يكون صحيحاً كغيره طالما لا يحدث تسارع. إن أفكار "مركز الكون" و"الــسكون" هــي أفكار نسبية. لو قسنا الموضع أو السرعة، فإننا يجب أن نقوم بذلك بالنسبة لشيء ما، كالأرض أو الشمس أو بالنسبة لسفينة فضاء تسير في الفراغ.

التسارع مختلف!

لاحــظ أينــشتاين شيئاً خاصاً حول الأطر المرجعية المتسارعة مقارنة بالأطر المرجعية غير المتسارعة. يكــون هذا الفرق ظاهرياً إذا أخذنا بالاعتبار حالة المراقب الموجود داخل حجرة مُحكمة الإغلاق وشافة (غير شفافة).

افتــرض أنــك في ســفينة نــوافذها مغطاة، وتم وضع المعدات الرادارية والملاحية في حالة الوضع الاحتياطــي. لا توجد طريقة بالنسبة لك لفحص البيئة المحيطة وتحديد مكانك، وسرعة تحركك أو الاتجاه الذي تتحرك وفقه. ولكن، يمكنك الإخبار إن كانت السفينة متسارعة أم لا. وتستطيع ذلك لأن التسارع يُطبِّق وبشكل دائم قوة على الأجسام داخل المركبة.

عند إطلاق محركات السفينة واكتساب المركبة للسرعة بالاتجاه الأمامي، تتعرض جميع الأجسام داخل الــسفينة (بمــا فيها جسمك) لقوة تتجه للخلف. إذا أطلقت صواريخ كبح السفينة بحيث تتباطأ السفينة، يخضع كل شيء في السفينة لقوة تتجه للأمام. إذا أُطلقت المحركات الصاروخية الموجودة في جانب السفينة بحيث تغيِّر السفينة اتجاهها دون تغيير سرعتها، فهذا يُعتبَر شكلاً من أشكال التسارع وسيؤدي لتعرض كل شيء داخل السفينة لقوة جانبية بعضها موضح في الشكل (20-5).



الشكل (20-5): عندما لا تتسارع المركبة في الفضاء السحيق، لا يوجد عندها أي قوة مُطبّقة على الأجسام داخلها. عندما تتسارع المركبة، توجد دائماً قوة مُطبّقة على الأجسام داخلها.

كلما ازداد التسارع أو ازداد التغير في شعاع السرعة الذي تخضع له سفينة الفضاء، كلما ازدادت القوة المطبقة على كل جسم داخلها. إذا كانت m كتلة جسم داخل السفينة (بالكيلوغرام) وa تسارع السفينة (بالمتر بالثانية بالثانية)، وبالتالي فإن القوة F (بالنيوتن) هي حاصل ضربهما:

$$F = ma$$

إنها أحد أكثر الصيغ شهرة في الفيزياء والتي يجب أن تتذكرها من الفصل السابع.

تحدث *قوة التسارع* هذه حتى لو كانت نوافذ السفينة مغطاة، وكان الرادار مفصولاً، وحتى لو تم وضع المعدات الملاحية في وضع احتياطي. لا توجد أي طريقة يمكن بواسطتها طرد القوة. فكر أينشتاين بهذه الطريقة، يمكن للمسافرين بين النجوم تحديد إذا كانت السفينة تتسارع أم لا. ليس ذلك فقط، بل يمكنهم حساب طويلة التسارع وتحديد الاتجاه أيضاً. عندما تتسارع السفينة، تتواجد بمعنى معين، أطر مرجعية مطلقة في الكون.

مبدأ التكافؤ

تخيل أن سفينتنا الفضائية، وبدلاً من أنها تتسارع في الفضاء السحيق، قد حطت على سطح كوكب. قد تهبط وذيل السفينة للأسفل بحيث تشد قوة الجاذبية الأجسام داخلها وكأن السفينة تتسارع باتجاه الأمام. قد تهبط ومقدمة السفينة للأسفل بحيث تشد الجاذبية الأجسام داخلها وكأن تسارع السفينة يتباطأ. قد تكون السفينة متجهة باتجاه آخر بحيث تشد قوة الجاذبية الأجسام داخلها وكأن السفينة تغيّر مجراها باتجاه جانبي. يمكن أن يتألف التسارع من تغيّر في السرعة أو تغيّر في الاتجاه أو تغيّر في كليهما.

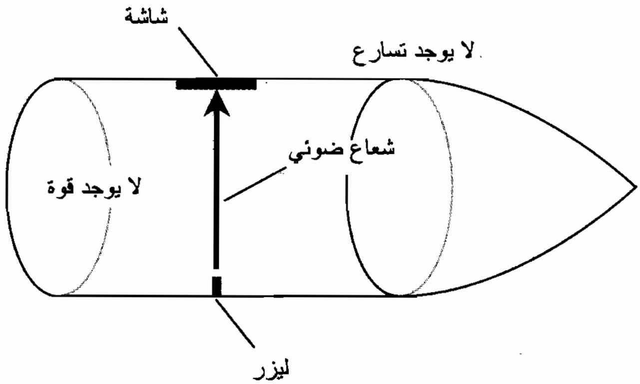
إذا بقيت النوافذ مغطاة، والرادار مغلق، والمساعدات الملاحية في حالة وضع احتياطي، كيف يستطيع المسافرون في مركبة كهذه معرفة أن القوة ناتجة عن الجاذبية أو عن التسارع؟ يجيب أينشتاين: لا يستطيعون التمييز.

أتى من هذه الفكرة *مبدأ التكافؤ*. إن ما تُدعى بقوة التسارع هي نفسها قوة الجاذبية. علل أينشتاين ذلك بتصرف القوتين بأسلوب متطابق في كل شيء، من ملاحظات الناس للذرات والأشعة الضوئية إلى بنيان فضاء – زمن. إنها أسس نظرية النسبية العامة.

الانحناء الفضائي

تخيل أنك تسافر في سفينة فضاء في الفضاء السحيق. تم إطلاق صواريخ السفينة، والسفينة تتسارع بمعدل هائل. افترض أن الجهاز الليزري الموصوف سابقاً في هذا الفصل موجود في السفينة ولكن وبدلاً من وجود مرآة على الجدار المقابل لليزر، توجد شاشة. قمت قبل بدء التسارع بضبط الليزر بحيث يشع إلى مركز الشاشة (الشكل (20-6)). ماذا سيحدث عند إطلاق الصواريخ وتسارع السفينة؟

في السيناريو الحقيقي، لن تتحرك بقعة الليزر بشكل كافٍ على الشاشة بحيث تلاحظها. يحدث ذلك لأنه لن يسبب أي معدل تسارع معقول (أي غير مهدد للحياة) قوة كافية للتأثير على الحزمة. ولكن، دعنا نُعلّق عدم تصديقنا ونتخيل أننا نستطيع جعل المركبة تتسارع بأي مُعدّل، ولا مشكلة في مدى كبره، دون التزاحم عند الجدار الخلفي المقابل في السفينة. إذا تسارعنا بشكل سريع وكافٍ، ستسحب السفينة الحزمة الليزرية بعيداً عن مسار انتقالها عبر السفينة. نرى نحن، المراقبون للحالة من داخل السفينة، الحزمة الضوئية تتبع مساراً منحنياً (الشكل (20-7)). يرى مراقب ثابت من الخارج أن الحزمة الليزرية تتبع مساراً مستقيماً، ولكن تشد المركبة الحزمة للأمام خارجاً. الشكل (20-8)).



الشكل (20-6): كما تُرى من داخل السفينة، تنتقل الحزمة الليزرية وفق خط مستقيم عبر المركبة عندما لا تتسارع.

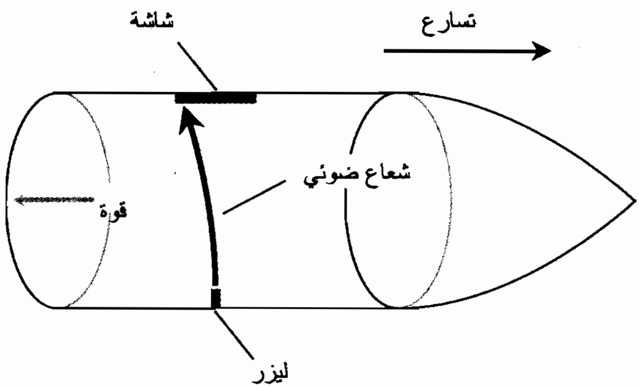
بغض النظر عن الإطار المرجعي، يتبع الشعاع الضوئي دائماً أقصر مسار ممكن بين الليزر والشاشة. تظهر الأشعة الضوئية منحنية عند مشاهدهما من أي إطار مرجعي غير متسارع. تكون أقصر مسافة ممكنة بين نقطتين في نهايتي حزمة الليزر المتقابلتين في الشكل (20–7)، في الحقيقة، منحنية. يكون المسار الذي يظهر مستقيماً في الحقيقة أطول من المسار المنحني، وذلك كما يُرى من داخل مركبة متسارعة! قادت هذه الظاهرة بعض الأشخاص للقول بأن "الفضاء منحنٍ" في حقل تسارع قوي. تسبب الجاذبية القوية بسبب مبدأ التكافؤ *انحناء الفضاء*.

كي يظهر الانحناء الفضائي بشكل ملحوظ كما يظهر في الشكل (20–7) والشكل (20–8)، يجب أن تتسارع المركبة في فضاء ضخم للغاية. الوحدة القياسية للتسارع هي المتر بالثانية بالثانية أو المتر بالثانية مربع (m/s^2). يُعبِّر رواد الفضاء والمهندسون الجوِّيون أيضاً عن التسارع بوحدات تدعى *الثقالة* (ويرمز لها g)، حيث إن واحد ثقالة (1 g) هو التسارع الذي يُنتج القوة نفسها التي ينتجها حقل الجاذبية الأرضي على السطح والذي يساوي تقريبا $9.8\ m/s^2$. (لا تخلط بين اختصار الثقالة واختصار الغرام! انتبه للسياق إذا رأيت وحدة رمزها g). توضح الرسومات في الشكل (20–7) والشكل (20–8) سفينة فضاء متسارعة يبلغ تسارعها عدة آلاف من الثقالة. إذا كنت تزن 150 باونداً على الأرض، فإنك ستزن أطناناً كثيرة في سفينة متسارعة أو في حقل جاذبية بهذه الشدة، حيث يؤدي ذلك لمزيد من الانحناء الفضائي.

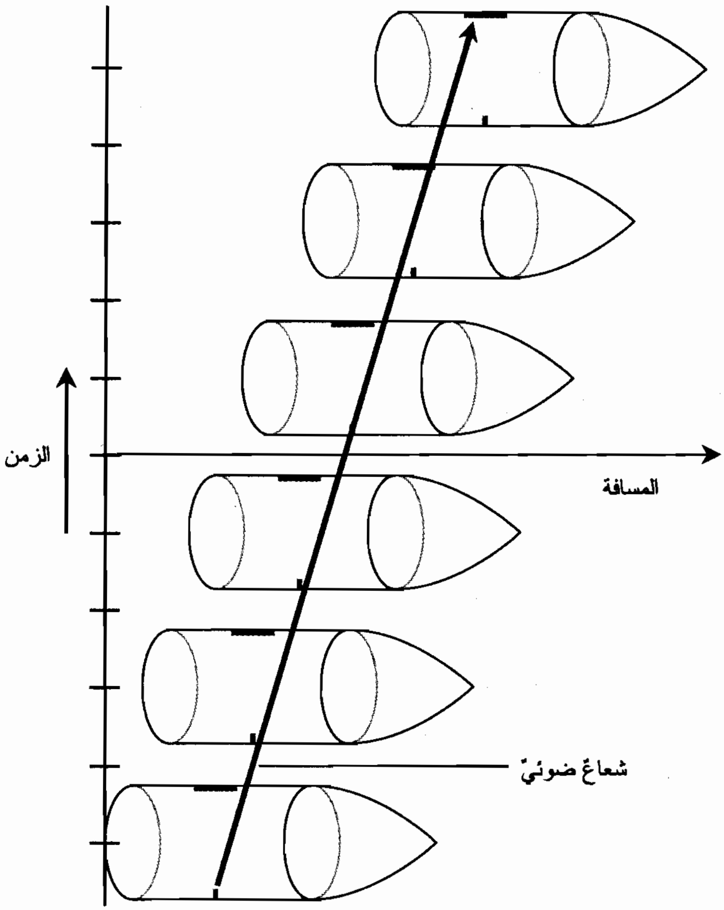
هل ذلك مجرد تمرين أكاديمي؟ هل توجد فعلياً حقول جاذبية قوية كفاية "لثني الأشعة الضوئية" بشكل كبير؟ نعم. إنها موجودة بقرب آفاق الحدث للثقوب السوداء.

التمدد الزمني الناجم عن التسارع أو الجاذبية

يؤدي الانحناء الفضائي الناجم عن التسارع الشديد أو الناجم عن الجاذبية إلى تباطؤ الزمن بشكل فعال. تذكر البديهية الرئيسية للنسبية الخاصة: سرعة الضوء ثابتة، ولا مشكلة في نقطة المراقبة. تنتقل الحزمة الليزرية المسافرة عبر سفينة الفضاء، كما هو موضح في بعض الأمثلة التوضيحية في هذا الفصل، دائماً بالسرعة نفسها. إنه شيء يجب أن يتفق عليه جميع المراقبين في جميع الأطر المرجعية.



الشكل (20–7): كما تُرى ضمن السفينة، تنتقل الحزمة الليزرية بمسار منحنٍ في المركبة عندما تتسارع بمعدل عالٍ.



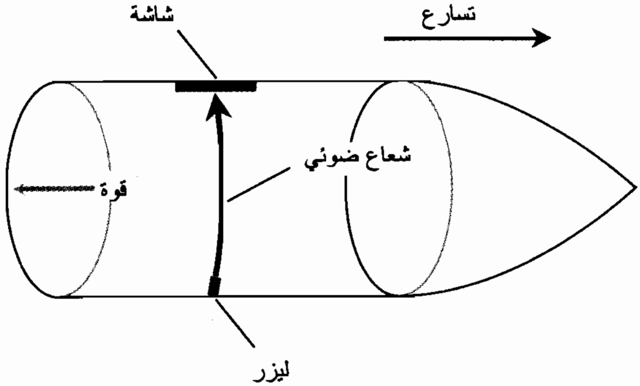
الشكل (20–8): عند معاينتها من إطار مرجعي "مستقر" خارج السفينة، تسحب المركبة المتسارعة الحزمة الليزرية بعيداً عن المسار المستقيم بحيث لا ترتطم الحزمة الليزرية بمركز الشاشة.

إن مـــسار الشعاع الضوئي عند انتقاله من الليزر إلى الشاشة أطول في الحالة الموضحة في الشكل (20–7) مـــن مسار الشعاع الضوئي في الحالة الموضحة في الشكل (20–6). إن ذلك جزئي لأن الشعاع ينتقل في مسار قطري بدلاً من انتقاله بشكل مستقيم. ولكن بالإضافة لذلك، فإن المسار منحنٍ. ورغم ذلك يزداد المجال الزمني. من نقطة ذات أفضلية لمسافر في سفينة فضاء، يمثل المسار المنحني الموضح في الشكل (20–7) أقصر مسار ممكن يستطيع الشعاع الضوئي سلوكه في المركبة بين النقطة التي يغادر الليزر منها ونقطة ارتطامه بالشاشة.

يمكـــن تدويـــر جهاز الليزر نفسه بشكلٍ طفيف ليتجه قليلاً باتجاه مقدمة السفينة؛ سيؤدي ذلك لوصول الحزمة إلى مركز الشاشة (الشكل (20–9)) بدلاً من ابتعادها عنه. ولكن، يبقى مسار الحزمة منحنياً ويبقى أطول من مساره عندما لا تكون السفينة متسارعة (انظر إلى الشكل (20–9)). تُمثّل الساعة الليزرية الساعة الأكثر دقة لاعتمادها على سرعة الضوء والتي تشكل ثابتاً مطلقاً. وبالتالي ينتج التمدد الزمني عن التسارع وليس فقط كما

يُــرى من قبل المراقبين الذين ينظرون إلى السفينة من الخارج، بل أيضاً بالنسبة للمسافرين داخل المركبة نفسها. يكون التسارع والجاذبية في هذه الحالة "ممددين زمنياً" بشكل أكثر قوة من الحركة النسبية.

لــنُعلّق عــدم تصديقنا مرة أخرى، ولنفترض أننا نستطيع تطبيق قوة تسارع شديدة كهذه (أو قوة جاذبــية) دون الــتقلص فيزيائياً، وستدرك فعلياً عندها أن الزمن يتباطأ في المركبة تحت شروط كتلك التي تؤدي لانحناء الفضاء وتوضح الأشكال (20–7) أو (20–9) أو (20–10) ذلك. ستبدو الساعات حقيقية وأنها تجري بشكل أكثر بطئاً، وذلك إذا نظرنا إليها من خلال أطر مرجعية داخل السفينة. بالإضافة لذلك، سيظهر كل شيء داخل السفينة ذي شكل منحنٍ.

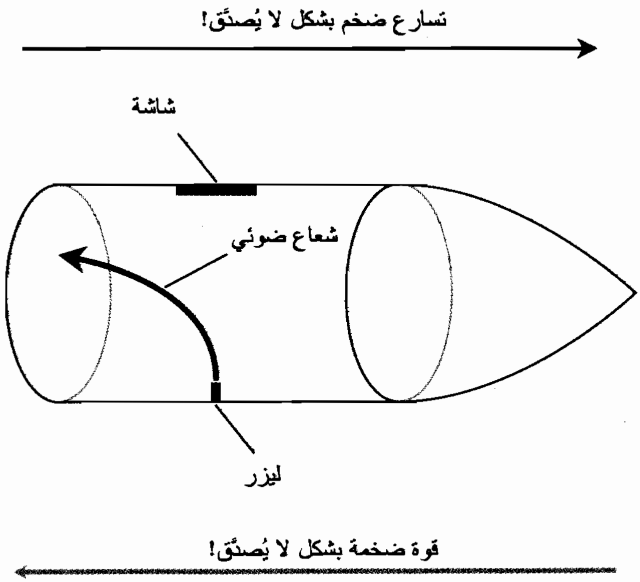


الشكل (20–9): حتى لو تم تدوير الليزر بحيث يصيب الشعاع الضوئي مركز الشاشة، يكون مسار الشعاع منحنياً عندما تتسارع السفينة بمعدل عالٍ.

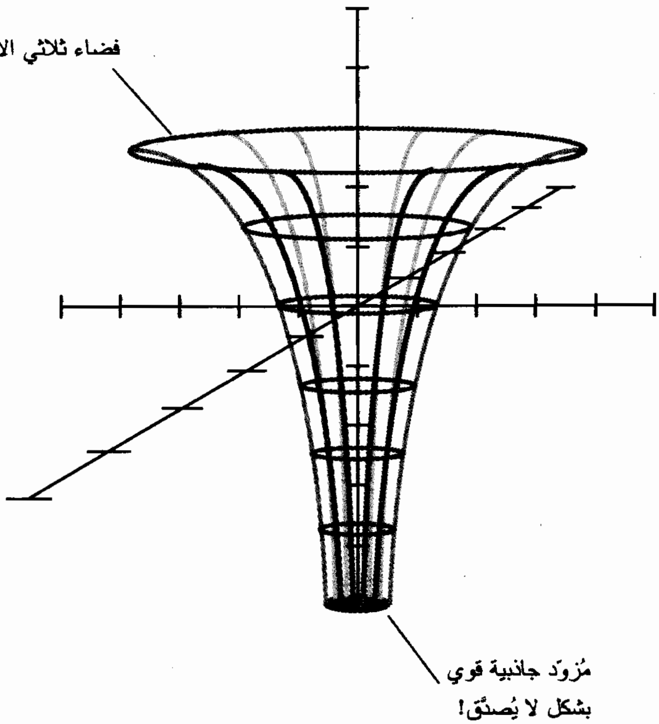
تأكيد المراقبة

عندما طور أينشتاين نظريته في النسبية العامة، تم حل بعض تناقضات النسبية الخاصة. (تم تجنب هذه التناقــضات لأن مناقــشتها كانت ستربكك فقط). تمت بشكل خاص مراقبة الأشعة الضوئية القادمة من النجوم البعيدة ومراقبة المادة بالقرب من الشمس لرؤية هل حقل الجاذبية الشمسي – والذي يُعتبر قوياً جداً بالقرب من سطح الشمس – سيحني الأشعة الضوئية أم لا. سيُلاحَظ هذا الانحناء كتغير في الوضع الظاهري للنجم البعيد في السماء بمرور الشمس بالقرب منه (الشكل (20–10)).

كانت المشكلة مع هذا النوع من المراقبة، كما تظن، هي حقيقة أن الشمس أكثر سطوعاً من أي نجم آخر في الــسماء، وســيزيل ضــوء الشمس طبيعياً الإنارة الخافتة القادمة من النجوم البعيدة. ولكن، أثناء الكسوف الشمــسي الكلي، يُحجب قرص الشمس بواسطة القمر. بالإضافة لذلك، يكون القطر الزاوي للقمر في السماء مــساوياً لقطر الشمس الزاوي تماماً تقريباً، وبالتالي يمكن رؤية ضوء النجوم البعيدة المار بالقرب من الشمس من قــبل مــراقبين أرضيين أثناء الكسوف الكلي. عندما جرى تنفيذ هذه التجربة، انــزاح الوضع الظاهري للنجم البعيد في الواقع بوجود الشمس، وحدث هذا التأثير بالمدى نفسه الذي طرحته النسبية العامة لأينشتاين.



الشكل (20–10): إذا كان التسارع كبيراً بدرجة كافية، يصبح الانحناء الفضائي هائلاً.



الشكل (20–11): الانحناء الفضائي في جوار جسم يُنتج حقل جاذبية شديد.

تم حديثاً مراقبة الضوء الصادر عن شبه نجم معين بمروره بالقرب من ثقب أسود مشبوه. اتبع الضوء الـــوارد من شبه النجم في طريقه إلينا عدة مسارات منحنية حول الجسم الهائل المظلم. أنتج ذلك عدة صور لـــشبه النجم، وكانت هذه الصور مرتبة على شكل "إشارة جمع" أو "ضرب" مع وجود الجسم الأسود في المركز.

تم تـــشبيه انحـــناء الفضاء بوجود حقل جاذبية قوي بالقمع (الشكل (20-11))، باستثناء أن سطح القمـــع ثلاثـــي الأبعاد بدلاً من ثنائي الأبعاد. تكون أقصر مسافة بين نقطتين بالقرب من مُزوِّد جاذبية في الفضاء ثلاثي الأبعاد دائماً منحنية في الفضاء رباعي الأبعاد. يستحيل بالنسبة لمعظم (إذا لم يكن لكل) الناس تـــصوره مباشرة دون "الغش" بإزالة بعد واحد. وعلى الرغم من ذلك فالرياضيات واضحة بشكل كافٍ، وقد أظهرت المراقبة أنها توضح الظاهرة بشكل صحيح.

ماذا بعد...

قمنا في هذا الفصل "بتجارب العقل" حيث استلزم الكثير منها تعليق الحقيقة مؤقتاً. في الحياة الحقيقية، ســـتقتل ســـيناريوهات كهذه كلّ من يحاول إجراء المراقبة. إذاً لماذا النظرية النسبية هامة؟ إذا كان الفضاء منحنياً، والزمن يتباطأ بشكل لا يصدق بواسطة حقول الجاذبية القوية، إذا ماذا بعد؟

تلعـــب النسبية العامة دوراً هاماً في تطوير النظريات المتعلقة بهندسة الكون وارتقائه. تكتسب الجاذبية على نطاق واسع مظهراً مختلفاً عن المقياس المحلي. يكون الثقب الأسود الصغير، كالثقب المحيط بنجم منهار، كثـــيفاً ويُنـــتج جاذبية قوية كافية لتدمير أي جسم مادي يعبر أفق الحدث. ولكن، إذا كانت كتلة الثقب الأسود كافية، فلن تكون كثافته كبيرة بالضرورة. يمكن أن تتواجد ثقوب سوداء بكتلة تبلغ كادريليونات كـــتلة الـــشمس، نظرياً على الأقل، دون وجود قوى مهددة للحياة في نقطة تقع بالقرب من آفاق الحدث الـــتابعة لهـــا. لو وُجد ثقب أسود كهذا، ولو طوّرنا سفن فضاء قادرة على الطيران بين المجرات، سنكون قادرين على عبور أفق الحدث التابع لها بسلام، لنغادر هذا الكون وندخل في آخر- للأبد.

امتحان موجز

عـــد إلى النص في هذا الفصل عند الضرورة. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن ثمانية أسئلة بشكل صحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب.

1. الوحدة الشائعة للتسارع هي
   (a) متر بالثانية.
   (b) كيلومتر بالثانية.
   (c) كيلومتر بالساعة.
   (d) ثقالة.

2. افتــرض أنــه لديك كرة كروية كتلتها مائة غرام (100 g) في حالة السكون. إذا رميت هذه الكتلة بسرعة تبلغ ثلاثة أرباع سرعة الضوء، فكم ستصبح كتلتها، مقاسة من نقطة مراقبة ثابتة؟

(a) 100 g

(b) 133 g

(c) 151 g

(d) لا يمكن حسابها من هذه المعلومات.

3. افتــرض أن القطــر الظاهري للكرة الواردة في السؤال 2 مقاساً بشكل جانبي (بشكل عرضاني باتجاه حركتها)، يساوي مائة ميليمتر (100 mm) عندما تكون سرعتها مساوية لثلاثة أرباع سرعة الضوء. كم سيكون قطرها عندما تعود إلى حالة السكون؟

(a) 100 mm

(b) 133 mm

(c) 151 mm

(d) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

4. إذا كانــت سفينة فضاء تتباطأ، والسرعة تنخفض بالاتجاه الأمامي، ستتجه القوة الناتجة داخل السفينة باتجاه

(a) الذيل.

(b) المقدمة.

(c) الجانب.

(d) لا تتجه بأي اتجاه؛ لا توجد قوة تسارع.

5. تجربة ميكلسون–مورلي

(a) وضحت اعتماد سرعة الضوء على الاتجاه الذي تقاس وفقه.

(b) وضحت اعتماد سرعة الضوء على شعاع سرعة المراقب.

(c) وضحت عدم اعتماد سرعة الضوء على الاتجاه الذي تقاس وفقه.

(d) أثبتت أن الأثير يمر عبر الأرض.

6. إذا كنت تطوف في مركبة فضاء تسارعها $9.8\ m/s^2$ في الفضاء بين الكواكب، ستشعر بالقوة نفسها التي كنت ستشعر بها لو كنت لا تزال جالساً على سطح الأرض. إنه تعبير عن

(a) خاطئ تماماً! السفر في الفضاء لا يشبه أبداً البقاء على الأرض.

(b) حقيقة أن سرعة الضوء مطلقة، ونهائية، وثابتة، وهي أكبر سرعة معروفة.

(c) مبدأ التكافؤ لأينشتاين.

(d) نتائج تجربة ميكلسون-مورلي.

7. افترض أنك ترى سفينة فضاء تندفع بسرعة الضوء. ما هو عامل التمدد الزمني k الذي ستلاحظه عندما تقيس سرعة الساعة داخل السفينة وعند مقارنته بسرعة الساعة الثابتة بالنسبة لك؟

(a) 1

(b) 0

(c) لا نهائي

(d) غير مُعرّف

8. ستتبع بعض الحزم الضوئية مسارات منحنية

(a) مهما تكن الظروف.

(b) عند قياسها داخل سفينة فضاء تطوف بسرعة الضوء.

(c) عند قياسها بوجود حقل جاذبية هائل.

(d) عند قياسها من إطار مرجعي غير متسارع.

9. افترض أنك ركبت سفينة فضاء وسافرت باتجاه نجم الشعرى اليمانيَّة (Sirius) بسرعة 150,000 km/s، والتي تساوي نصف سرعة الضوء تقريباً. لو قست سرعة الضوء الواصل من نجم الشعرى اليمانيّة (Sirius)، فما هو الرقم الذي ستحصل عليه؟

(a) 150,000 km/s

(b) 300,000 km/s

(c) 450,000 km/s

(d) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

10. تستحيل مزامنة الساعات الموجودة في مواقع مختلفة من كل إطار مرجعي ممكن بسبب

(a) أن سرعة الضوء مطلقة، ونهائية، وثابتة، وهي أكبر سرعة معروفة.

(b) اعتماد سرعة الضوء على موقع الإطار المرجعي الذي تُقاس منه.

(c) اعتماد سرعة الضوء على شعاع سرعة الإطار المرجعي الذي تقاس منه.

(d) لا يوجد شيء كالساعة الكاملة.

اختبار: الباب الثالث

لا تعـد إلى الـنص عـند تقديم هذا الاختبار. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن *37* سؤالاً بشكل صـحيح، علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب. يُفضَّل أن يكون لديك صديق يقوم بتدقيق الأجوبة في المـرة الأولى لـتقديمك الاختـبار، وبالتالي لن تتذكر الأجوبة ويمكنك تقديم الامتحان مرة أخرى إذا رغبت.

1. موجة ترددها 10^5 Hz. ما هو الدور بالمايكرو ثانية؟
   (a) 10^{-5}
   (b) 10^2
   (c) 10
   (d) 1,000
   (e) يعتمد الدور على سرعة الانتشار.
2. عاكس الغازغرين
   (a) له مرآة جسمية مُقعَّرة ومرآة ثانوية مسطحة.
   (b) له مرآة جسمية مُقعَّرة ومرآة ثانوية مُحدَّبة.
   (c) له أنبوب أطول من مكافئة في العاكس النيوتوني.
   (d) يعاني من ترهل العدسة إذا كان قطر المرآة الجسمية كبيراً جداً.
   (e) تم تثبيت المرآة العينية داخل الأنبوب.
3. تُستخدم الجرعات الإشعاعية المُركّزة في بعض الأحيان
   (a) لمراقبة الحشرات.
   (b) تحسين الخصوبة الأنثوية.
   (c) معالجة الماء الأزرق في العين.

(d) معالجة الأورام السرطانية.

(e) تخفيف الغثيان.

4. أي العبارات التالية خاطئة؟

(a) تستطيع العدسة المُحدَّبة إحضار أشعة الضوء المتوازية إلى المحرق.

(b) تستطيع العدسة المُقعَّرة جعل الأشعة الضوئية الواردة من نقطة المُزوِّد متوازية.

(c) يمكن استخدام المرآة المُحدَّبة كمرآة جسمية رئيسية في التلسكوب الكاسر.

(d) تُظهر العدسة المُقعَّرة الأجسام القريبة صغيرة.

(e) يمكن استخدام العدسة المُحدَّبة كعدسة جسمية رئيسية في التلسكوب الكاسر.

5. يجـــري مزج موجتين. ترددالهما 5.00 MHz و500 kHz، على التوالي. أي من الترددات التالية يمثل تردد الخفقان الناتج عن هيترودين هاتين الإشارتين؟

(a) 2.50 MHz

(b) 2.50 GHz

(c) 10.0 MHz

(d) 4.50 MHz

(e) ولا أي تردد مما ورد أعلاه.

6. بغض النظر عن الإطار المرجعي هل هو متسارع أو لا، فإن الأشعة الضوئية دائماً

(a) تنتقل في مسارات مستقيمة.

(b) تتبع أقصر مسار ممكن بين نقطتين في الفضاء.

(c) تنتقل في مسارات منحنية.

(d) يجري صدها بواسطة حقول الجاذبية.

(e) تتحرك بشكل أسرع في اتجاه الحركة.

7. افترض أن عيِّنة من مادة تحتوي على عدد ضخم من الذرات المُشعّة. قمت بقياس المدة الزمنية اللازمة لتحلل 10,000 عيِّنة وقمت بحساب متوسط النتائج. وبالتالي يدعى زمن التحلل المتوسط

(a) نصف العمر.

(b) متوسط العمر.

(c) عمر الاضمحلال.

(d) عمر التأين.

(e) عمر التحلل.

8. عند إشعاع الضوء القادم من الشمس لجسم كروي عاكس ككرة فولاذية، الأشعة المنعكسة

(a) متوازية.

(b) تتباعد.

(c) تتقارب.

(d) تتركز في نقطة ساخنة بشكل كافٍ بحيث تبدأ بالحرق.

(e) تتصرف بشكل لا يمكن التنبؤ به.

9. تخـيل سفينة فضاء تندفع بسرعة بحيث تبدو الساعات على متنها، كما تُرى من نقطة مراقبتنا لها على الأرض، وكأنها تسير بثلث سرعتها الطبيعية. افترض أن كتلتك على الأرض 60 kg وصديقتك تركب في السفينة وكتلتها 60 kg على الأرض. إذا قاست صديقتك كتلتها أثناء السفر في السفينة، فستلاحظ أنها تزن؟

(a) 20 kg

(b) 60 kg

(c) 180 kg

(d) 540 kg

(e) لا يمكن تحديد وزنها دون معرفة المزيد من المعلومات.

10. الأمواج الكهرطيسية (EM) ذات الترددات الراديوية

(a) مرئية للعين المجردة.

(b) شكل من الأشعة المؤينة التي يمكن أن تسبب طفرات جينية.

(c) تستطيع الانتشار لمسافات طويلة في الهواء.

(d) يحجبها الغلاف الجوي بشكل كامل.

(e) تُنتج انحناء فضاء – زمن.

11. أي العبارات التالية خاطئة

(a) مجال الضوء المرئي هو جزء صغير من الطيف الكهرطيسي.

(b) تمتلك أشعة غاما قدرة اختراق كبيرة.

(c) إشعاع (ELF) ذو التردد المنخفض للغاية هو شكل من أشكال النشاط الإشعاعي.

(d) الأمواج الميكروية أطول من أمواج الأشعة تحت الحمراء (IR).

(e) أشعة x أقصر من أمواج الضوء المرئي.

12. في المجهر المُركّب،

(a) العدسة الجسمية مُحدَّبة والعينية مُقعَّرة.

(b) كل من العدستين الجسمية والعينية مُقعّرة.

(c) المرآة الجسمية مُقعَّرة والعدسة العينية مُحدَّبة.

(d) الطول المحرقي للعدسة العينية أطول من نظيره للعدسة الجسمية.

(e) الطول المحرقي للعدسة العينية أقصر من نظيره للعدسة الجسمية.

13. يُستخدم عمر الكربون لتقدير

(a) حجم الكون.

(b) درجة حرارة سطح الشمس.

(c) معدل تدهور طبقة الأوزون.

(d) ارتفاع الأيونسفير.

(e) لا يُستخدم في أي مما ورد أعلاه.

14. أملأ الفراغ في الجملة التالية: "عندما تتحرك سفينة فضاء بسرعة تقترب من سرعة الضوء بالنسبة لمراقب، ستظهر الساعة لمراقب على متن السفينة وكأنها ____________".

(a) تسير بسرعة كبيرة.

(b) متوقفة.

(c) تسير ببطء شديد.

(d) تسير بسرعة لا نهائية.

(e) تسير بسرعة طبيعية.

15. أثبتت تجربة الشق المضاعف أن

(a) الأمواج الصوتية تستطيع الالتفاف حول الزوايا.

(b) للإلكترونات والبوزيترونات شحنة كهربائية متعاكسة.

(c) للضوء المرئي خصائص موجية.

(d) المادة تتكون في معظمها من فضاء فارغ.

(e) الحقول الكهرطيسية تستطيع الانتقال في الخلاء.

16. افترض أن سفينة فضاء تنطلق بسرعة بحيث تبدو الساعات على متنها، من نقطة مراقبة مرتبطة بنا، بأنها تجري بنصف السرعة. إذا كانت الكتلة السكونية للمادة 50 طناً مترياً، فكم ستكون كتلة السفينة التي ستنطلق بها من نقطة المراقبة المرتبطة بنا؟

(a) 25 طناً مترياً.

(b) 50 طناً مترياً.

(c) 100 طناً مترياً.

(d) 400 طناً مترياً.

(e) لا يمكن تحديدها دون معرفة المزيد من المعلومات.

17. حقل EM طول موجته 120 m. يُمثّل ذلك

(a) حقل EM.

(b) موجة راديوية.

(c) طاقة ميكروويف (موجة ميكروية).

(d) طاقة تحت الحمراء.

(e) طاقة أشعة x.

18. يمكن أن يكون السفر في الزمن إلى المستقبل ممكناً بالاستفادة من

(a) التمدد الزمني النسبي.

(b) تشوه الكتلة النسبي.

(c) تشوه الفراغ النسبي.

(d) شد الجاذبية الأرضية.

(e) لا شيء! السفر في الزمن إلى المستقبل مستحيل نظرياً.

19. أي العبارات التالية خاطئة؟

(a) يحني الموشور الزجاجي الضوء الأخضر أكثر مما يحني الضوء البرتقالي.

(b) الطول المحرقي لعدسة زجاجية مُحدَّبة بسيطة أقصر بالنسبة للضوء الأخضر منه للضوء البرتقالي.

(c) يحدث القزح عندما يمر الضوء الأبيض في عدسة زجاجية بسيطة.

(d) تعتمد قرينة انكسار الزجاج على لون الضوء المُشعّ فيها.

(e) جميع العبارات الواردة أعلاه صحيحة.

20. لجميع الأمواج، أياً يكن الوسط الذي تنتشر فيه، ثلاث خصائص منفصلة ومترابطة وهذه الخصائص الثلاث هي

(a) التردد، وطول الموجة، وسرعة الانتشار.

(b) التردد، والسعة، وسرعة الانتشار.

(c) السعة، وشكل الموجة، والدور.

(d) طول الموجة، والسعة، والدور.

(e) شكل الموجة، وسرعة الانتشار، والسعة.

21. القطر الأعظمي للتلسكوب الكاسر محدود، عملياً،

(a) بترهل العدسة.

(b) بالزيغ الكروي.

(c) بالزيغ paraboloidal.

(d) بالطول المحرقي.

(e) بالقزح.

22. الأشعة تحت الحمراء ذات الشدة المنخفضة أو المتوسطة

(a) يمكن الشعور بها كحرارة أو سخونة الجلد.

(b) تنعكس بواسطة أيونسفير الأرض.

(c) تظهر بلون برتقالي أو أحمر.

(d) لها قدرة احتراق بالغة.

(e) تؤدي إلى تحلل إشعاعي بطيء.

23. افتـرض وجود ساعتين فائقتي الدقة، تدعيان الساعة A والساعة B، وهما متزامنتان على الأرض بحيث تكـونان متوافقـتين دائماً. تخيل الآن أنه تم وضع الساعة B على متن مركبة فضائية، وتم إرسالها إلى المريخ ثم عادت. جرت مقارنة القراءات بعد عودة السفينة. فماذا وجدنا؟

(a) لا تزال الساعتان A وB متوافقتين بدقة.

(b) الساعة A متأخرة عن الساعة B.

(c) الساعة A متقدمة عن الساعة B.

(d) يعتمد مما ورد أعلاه على مدى تسارع السفينة أثناء رحلتها.

(e) ولا عبارة مما ورد أعلاه.

24. امـلأ الفراغ في الجملة التالية: "بتخفيض الطول المحرقي للعدسة الجسمية في المجهر المُركّب، وعند بقاء جميع العوامل ثابتة، ______________".

(a) ينخفض التكبير.

(b) يزداد حقل الرؤية.

(c) تتناقص الدقة.

(d) يزداد التكبير.

(e) لا شيء يتغير.

25. افتـرض أنك قمت بتوليف راديو سيارتك على حزمة إرسال بحيث تستطيع سماع هذه المحطة حتى لو كنت تقود في سهب أو وادٍ. يحدث هذا التأثير نتيجة

(a) انتشار الموجة.

(b) الانكسار.

(c) الانعكاس الكلي الداخلي.

(d) نص قانون سنل.

(e) الحقل المغنطيسي الأرضي.

26. ينص مبدأ أينشتاين في حالات التكافؤ على أن

(a) قوة الجاذبية كقوة التسارع.

(b) القوة تساوي الكتلة مضروبة بالتسارع.

(c) سرعة الضوء ثابتة، أياً تكن.

(d) سرعة الضوء هي أسرع سرعة ممكنة.

(e) أقصر مسافة بين نقطتين هي خط مستقيم.

27. أي من أنماط الإشعاع التالية (a، أوb أوc، أوd) ليس إشعاعاً مؤيناً؟

(a) الترددات المنخفضة للغاية.

(b) أشعة - x.

(c) أشعة غاما.

(d) الجُسيْمات الكونية الرئيسية.

(e) جميع أنماط الإشعاع أعلاه مؤينة.

28. يدعى جُسيْم الضوء المرئي

(a) البوزيترون.

(b) الإلكترون.

(c) النيترون.

(d) الفوتون.

(e) الألوميترون.

29. افترض أن مادة معينة ترسل ضوءاً بسرعة 150,000 km/s. ما هي قرينة انكسار هذه المادة بدقة ثلاثة أرقام؟

(a) 0.500

(b) 0.805

(c) 1.00

(d) 1.24

(e) 2.00

30. طبقة الأيونسفير الأرضية

(a) تحجب الأمواج الراديوية الواردة من الفضاء.

(b) تحجبنا عن أشعة x الشمسية.

(c) يمكن أن تُسبب إشعاعاً فوق بنفسجي (UV) مؤذياً.

(d) موجودة في طبقات الجو على ارتفاعات معينة من سطح الأرض.

(e) تختفي أثناء النهار.

31. افتـــرض وجـــود موجـــتين صوتيتين تنتقلان في الهواء، الموجة A والموجة B. تردد الموجة A يساوي 500 Hz، وتردد الموجة B يساوي 2,500 Hz. ماذا يمكننا أن نقول عن هاتين الموجتين؟

(a) تنتقل الموجة B بسرعة تبلغ خمسة أضعاف سرعة الموجة A.

(b) تنتقل الموجة A بسرعة تبلغ خمسة أضعاف سرعة الموجة B.

(c) تبلغ سعة الموجة B خمسة أضعاف سعة الموجة A.

(d) تبلغ سعة الموجة A خمسة أضعاف سعة الموجة B.

(e) ترتبط الموجتان بتناغم.

32. يمكن أن يحدث التشوه الفضائي بواسطة كل ما يلي باستثناء

(a) التسارع.

(b) الجاذبية.

(c) السرعة النسبية العالية.

(d) الثقوب السوداء.

(e) الرياح الشمسية.

33. املأ الفراغ في العبارة التالية لتكون صحيحة: "يمكن للضوء الوارد من مُزوِّد نقطي أن ــــــــــــ بواسطة عدسة مُحدَّبة".

(a) يصغر.

(b) ينتشر.

(c) يصبح متوازناً.

(d) ينعكس.

(e) يُحجب.

34. مـــن المعروف أو المعتقد أن المستويات العالية من الأشعة فوق البنفسجية، على المدى القصير أو على المدى البعيد تسبب جميع ما يلي باستثناء

(a) طمس لنظام المناعة عند البشر على المدى البعيد.

(b) تألق مواد معينة.

(c) سرطان الجلد.

(d) الماء الأزرق في العيون.

(e) استنفاذ الأوزون.

35. عندما قاس ميكلسون وموريلي سرعة الضوء في اتجاهات مختلفة، اكتشفا أنه

(a) تكون سرعة الضوء أبطأ باتجاه حركة الأرض في الفضاء.

(b) تكون سرعة الضوء أسرع باتجاه حركة الأرض في الفضاء.

(c) تسحب الأرض الأثير الحامل للضوء معها.

(d) سرعة الضوء نفسها في جميع الاتجاهات.

(e) لا يمكن تحديد سرعة الضوء بدقة.

36. أي العبارات التالية صحيحة بالنسبة لموجة EM في الفضاء الحر؟ افترض أنه يجري التعبير عن سرعة الانتشار بالمتر بالثانية، ويجري التعبير عن الدور بالثانية، ويجري التعبير عن التردد بالهرتز، ويجري التعبير عن طول الموجة بالمتر.

(a) سرعة الانتشار تساوي التردد مضروباً بطول الموجة.

(b) سرعة الانتشار تساوي التردد مقسوماً على طول الموجة.

(c) سرعة الانتشار تساوي التردد مضروباً بالدور.

(d) الدور يساوي سرعة الانتشار مقسومةً على طول الموجة.

(e) التردد يساوي سرعة الانتشار مضروبة بطول الموجة.

37. افترض أن شعاعاً ضوئياً صادراً عن شبه نجم بعيد يمر من أمام جسم مظلم، كثيف، هائل للغاية وقريب منا. تظهر عدة صور لشبه النجم حول الجسم المظلم. إن ذلك نتيجة

(a) التمدد الزمني.

(b) لانـــزياح الأحمر.

(c) للانحناء الفضائي.

(d) للزيغ الكروي.

(e) للزيغ اللوني.

38. يشير اصطلاح *انتشار الأورورا* إلى

(a) انعكاس الأمواج الراديوية بواسطة الأورورا.

(b) ميل الأورورا للحدوث بعد الانفجارات الشمسية.

(c) ميل الأورورا للحدوث بالقرب من الأقطاب المغنطيسية الأرضية.

(d) الحركات الغريبة التي تُلاحظ عادةً بالقرب من الأورورا.

(e) تأثيرات الأورورا على النسيج الحي.

39. تخيل كرة صلبة شفافة تماماً ومنتظمة بشكل كامل مع وجود تجويف كروي في المركز تماماً. تخيل مصباحاً ضـــوئياً وسمِّـــه المصباح *A*، وهو عبارة عن مُزوِّد نقطتي ذي سلك موضوع في مركز التجويف الكروي

وبالــتالي في مركز الكرة الزجاجية ككل. تخيل مصباحاً ضوئياً ثانياً في الهواء الطلق، وهو عبارة عن مُزوِّد نقطي ذي سلك أيضاً؛ وسمِّه المصباح B. كيف يمكن مقارنة الأشعة الضوئية الصادرة عن المصباحين؟

(a) يجري إشعاع الأشعة من كلا المصباحين خارجاً بخطوط مستقيمة وبالطريقة نفسها تماماً.

(b) تــنعكس أشعة المصباح A كلياً داخل التجويف في الكرة الزجاجية، ولكن يجري إشعاع الأشعة من المصباح B خارجاً وفق خطوط مستقيمة.

(c) تــتقارب الأشعة الصادرة عن المصباح A في نقطة ما خارج الكرة الزجاجية، ولكن تشع الأشعة من المصباح B خارجاً وفق خطوط مستقيمة.

(d) تتــباعد الأشــعة الصادرة عن المصباح A بشكل أكبر عندما تنبعث من الكرة الزجاجية مقارنة بالأشعة الصادرة عن المصباح B التي لا تمر في الزجاج.

(e) يستحيل إجراء المقارنة دون معرفة المزيد من المعلومات.

40. هاتف لاسلكي تردده العامل المعلن 900 MHz. يساوي هذا التردد

(a) 9.00×10^{5} Hz.

(b) 0.900 GHz.

(c) 9.00×10^{-4} GHz.

(d) 0.900 THz.

(e) 9.00×10^{8} kHz.

41. المُزوِّد العام لأشعة ELF هو

(a) اليورانيوم.

(b) المصباح الضوئي.

(c) سلك يمر فيه تيار مستمر.

(d) خلية شمسية.

(e) خط الشبكة العامة الكهربائية.

42. في المجهر المُركَّب، يمكن حذف التأثيرات المعاكسة للزيغ اللوني عملياً

(a) باستخدام مرآة جسمية بدلاً من استخدام عدسة جسمية.

(b) بإنارة العيِّنة من الخلف.

(c) بإنارة العيِّنة من الأمام.

(d) بزيادة المسافة بين العدسة الجسمية والعدسة العينية.

(e) باستخدام ضوء وحيد اللون لإنارة العيِّنة.

43. تم إثبات حدوث التمدد الزمني، كما توقعته نظرية النسبية الخاصة لأينشتاين بواسطة

(a) وضع الساعات الذرية في حقول جاذبية ذات شدات مختلفة.
(b) قياس الانــزياح الأحمر للضوء بمروره بالقرب من الشمس عندما يكون وارداً إلينا من نجوم بعيدة.
(c) مراقبة انحناء الفضاء في مركبة سريعة الحركة.
(d) مقارنة قراءة الساعة الذرية على الطائرة بقراءة ساعة مشابهة على الأرض.
(e) ولا أي ممــا ورد أعلاه؛ لا يمكن إثبات ذلك في السرعات الممكن تحقيقها باستخدام التكنولوجيا الحالية.

44. الموجة التي تُركِّز كل طاقتها في تردد واحد لها شكل يمكن وصفه على أنه
(a) مربع.
(b) مستطيل.
(c) مثلث.
(d) سن منشار.
(e) جيبــي.

45. يحدث التشوه الفضائي النسبي الناتج عن شعاع السرعة النسبي العالي فقط
(a) في سرعات أسرع من سرعة الضوء.
(b) عندما تتسارع الأجسام.
(c) على طول محور الحركة النسبي.
(d) في الأجسام الكثيفة للغاية أو الأجسام الضخمة.
(e) في الثقوب السوداء.

46. إن عمق الحقل في المجهر المُركّب ذي التكبير العالي
(a) بشكل أساسي لا نهائي.
(b) كبير، من رتبة عدة كيلومترات.
(c) صغير، من رتبة بضعة مايكرو متر.
(d) يعتمد على مستوى الإنارة.
(e) يعتمد على نوع العيِّنة المستخدمة.

47. افترض أن حزمة ضوئية تتكون من فوتونات، بحيث تحتوي كل منها على الكمية نفسها من الطاقة. إذا ضُــرب تــردد الأمواج الضوئية بالعدد 5 (أي أصبحت UV)، ماذا سيحدث للطاقة المحتواة في كل فوتون؟
(a) لن تتغير.
(b) ستُصبح أكبر بخمسة أضعاف.
(c) ستُصبح بخمسة وعشرين ضعفاً.

(d) ستُصبح 1/5 قيمتها الأصلية.

(e) ستُصبح 1/25 قيمتها الأصلية.

48. يظهر القمر الصاعد مائلاً إلى الحمرة في بعض الأحيان بسبب

(a) انتشار الضوء الأحمر بواسطة الغلاف الجوي بشكل أكبر من انتشار أنواع الضوء الأخرى.

(b) انتشار الضوء الأحمر بواسطة الغلاف الجوي بشكل أقل من انتشار أنواع الضوء الأخرى.

(c) امتلاك الغبار الموجود في الهواء هالة مائلة للحمرة دائماً.

(d) الذرات في الهواء حمراء فعلياً.

(e) حدوث خداع بصري.

49. يمكن صناعة تلسكوب باستخدام

(a) عدسة جسمية مُقعَّرة وعدسة عينية مُحدَّبة.

(b) عدسة جسمية مُحدَّبة وعدسة عينية مُقعَّرة.

(c) مرآة جسمية مُحدَّبة وعدسة عينية مُقعَّرة.

(d) عدسة جسمية مُقعَّرة وعدسة عينية مُقعَّرة.

(e) أي مما ورد أعلاه.

50. افترض أنه توجد موجتان جيبيتان، الموجة A والموجة B، تتحركان في الهواء. ترددهما متطابقة ولنقل 800 Hz. الموجة A موجة مربعة، والموجة B سن منشار. ماذا يمكننا أن نقول عن هذه الأمواج؟

(a) تُركّز كلتا الموجتين A وB طاقتيهما في التردد 800 Hz.

(b) يختلف جرس الموجة A عن نظيره في الموجة B.

(c) تتحرك الموجتان A وB في الهواء بسرعات مختلفة.

(d) سعتا الموجتين A وB مختلفتان.

(e) طول الموجتين A وB مختلف.

الامتحان النهائي

يحتوي هذا الامتحان على أسئلة من المادة من الباب الأول، والثاني، والثالث، ولا يحتوي على أسئلة من الباب صفر. لا تعد إلى الكتاب عند تقديم هذا الامتحان. تكون النتيجة جيدة إذا أجبت عن 75 سؤالاً بشكل صحيح. علماً أن الأجوبة موجودة في نهاية الكتاب. يُفضَّل أن يكون لديك صديق يدقق إجاباتك في المرة الأولى لتقديمك الامتحان، وبالتالي لن تتذكر الأجوبة إذا رغبت بتقديم الامتحان مرة أخرى.

1. تطلق بندقية مقذوفاً على شكل رصاصة صغيرة كتلتها 0.125 g بسرعة 100 m/s. بإهمال تأثير الجاذبية، ما هي طويلة شعاع كمية الحركة للجسم لحظة مغادرته البندقية؟

(a) 0.00125 kg. m/s.

(b) 0.0125 kg. m/s.

(c) 0.125 kg. m/s.

(d) 1.25 kg. m/s.

(e) 12.5 kg. m/s.

2. افترض أنك على متن سفينة فضاء في بيئة انعدام الوزن. قمت بربط كرة بخيط وقمت بتدوير الكرة حول جسمك بسرعة زاويّة ثابتة. شعاع تسارع الكرة

(a) يشير بالاتجاه نفسه لحركة الكرة في أي لحظة زمنية معطاة.

(b) يشير دائماً للداخل باتجاهك.

(c) يشير دائماً للخارج بعيداً عنك.

(d) صفر لأن شعاع السرعة لا يتغير.

(e) يشير باتجاه عامودي على المستوى الذي تدور به الكرة.

3. تُستهلك كمية معينة من الطاقة لتحويل عينة من مادة صلبة إلى الحالة السائلة، على افتراض أن المادة من النوع الذي يمكن أن يتواجد في أي من هاتين الحالتين. تتغيّر هذه الكمية بتغيّر المواد وتدعى

(a) طاقة التسييل.
(b) طاقة الانصهار.
(c) حرارة الاندماج.
(d) طاقة الذوبان.
(e) النقطة الحرجة.

4. الجسم المتحرك بشعاع سرعة منتظم، إذا لم يتعرض الجسم لقوة خارجية فإنه
(a) يصبح ساكناً تدريجياً.
(b) يصبح ساكناً فجأة.
(c) يسقط للأرض.
(d) يستمر بالحركة بشعاع السرعة.
(e) ليس له كمية حركة.

5. يكافئ ثلثا دورة ac
(a) 60 درجة في الطور.
(b) 120 درجة في الطور.
(c) 180 درجة في الطور.
(d) 240 درجة في الطور.
(e) 270 درجة في الطور.

6. ثلاثـــة ملفات قيمة كل تحريض منها 30 μH، موصولة على التفرع. ولا يوجد تحريض متبادل بينها. التحريض الصافي للمجموعة الموصولة على التفرع هو
(a) 30 μH.
(b) 90 μH.
(c) 10 μH.
(d) يعتمد على تردد ac المار فيها.
(e) يستحيل تحديده.

7. افتـــرض أنه تم ملء جرة بسائل، تم إدخال سائل آخر لا يتفاعل كيميائياً مع السائل الأول في الجرة. يمتزج السائلان تدريجياً مع بعضهما. إنهما عملية
(a) القزح.
(b) الانتشار.
(c) تغيّر في الحالة.

(d) الإندماج.
(e) بلوغ المعدل الجزيئي.

8. في دارة كهربائية، يمثل العدد العقدي j7−5
(a) مفاعله 5 أوم وسعة 7 فاراد.
(b) مقاومة 5 أوم ومفاعلة سعوية 7 أوم.
(c) مقاومة 5 أوم ومفاعلة تحريضية 7 أوم.
(d) مفاعلة 5 أوم وتحريض 7 هنري.
(e) لا يُمثّل أي مما ورد أعلاه.

9. عندما يكون ثنائي نصف ناقل في حالة انحياز عكسي مع جهد dc ثابت وأقل من جهد الانهيار،
(a) ينقل بشكل جيد.
(b) ينقل لبعض الوقت.
(c) ينقل بصورة رديئة أو ليس بشكل كلي.
(d) يملك مقاومة منخفضة.
(e) يملك تحريضاً عالياً.

10. البروتونات والنيترونات
(a) لها الكتلة نفسها تقريباً، ولكن تمتلك البروتونات شحنة كهربائية بينما لا تمتلك النيترونات شحنة.
(b) الكتل مختلفة كثيراً ولكن تمتلك شحنات كهربائية متساوية ومتعاكسة.
(c) الكتل مختلفة كثيراً ولكن تمتلك شحنات كهربائية متطابقة.
(d) لا تمتلك كتلة ولا شحنة كهربائية وتتحرك بسرعة الضوء.
(e) تُباد إذا اصطدمت ببعضها.

11. افتــرض أن سرعة الساعة لكمبيوتر معين محددة بالجيغا هرتز. إذا رغبت بدلا من ذلك التحدث عن سرعة الساعة بالتيرا هرتز. ستستخدم عدداً
(a) أكبر بألف مرة.
(b) أكبر بمليون مرة.
(c) أصغر بألف مرة.
(d) أصغر بمليون مرة.
(e) بالحجم نفسه.

12. حتى لو كان الجهد المطبق على العيِّنة كبيراً، فإن التيار المار فيها صغير إذا
(a) كانت القيمة الأومية منخفضة.

(b) كان التحريض مرتفعاً.

(c) مرت الإلكترونات بسهولة من ذرة إلى ذرة.

(d) كانت المادة ناقلة كالنحاس أو الفضة.

(e) كانت المقاومة عالية.

13. واحد مايكرو وات يكافئ

(a) 10^{-6} جول - ثانية.

(b) 10^{-6} جول بالثانية.

(c) 10^{-6} أمبير - ثانية.

(d) 10^{-6} أمبير بالثانية.

(e) 10^{-6} erg بالثانية.

14. إذا وضعت غلاية من الماء على مدفأة ساخنة، بحيث تنتقل الحرارة من المُضرم إلى الغلاية وتنتقل من الغلاية إلى الماء. إنه مثال

(a) للحَمل.

(b) للناقلية.

(c) للتبخر.

(d) للتكاثف.

(e) للإشعاع.

15. يمكن تحديد الممانعة المُميِّزة بشكل كامل بدلالة

(a) كمية سُلّمية.

(b) كمية شعاعية.

(c) حقل مغنطيسي.

(d) حقل كهربائي.

(e) مزيج من الجهد والتيار.

16. كشف التعديل هو إجرائية

(a) استعادة البيانات من حامل الإشارة.

(b) تحميل البيانات في حامل الإشارة.

(c) تحويل ac إلى dc.

(d) تحويل dc إلى ac.

(e) حذف التقلبات غير المرغوبة في الإشارة.

17. عندما يجري تحديد القساوة النسبية لمادتين وفقاً لمقياس Moh، تُطبَّق القاعدة أو القواعد التالية:
(a) تخدش المادة دائماً مادة أنعم منها؛ لا تخدش المادة أبدا مادةً أقسى منها.
(b) لا تستطيع المادة خدش أي مادة أنعم منها.
(c) تخدش المواد بعضها فقط عندما تكون مادة أكثر قساوة من المادة الأخرى.
(d) تتحطم المواد الأقسى عند ارتطامها بالمواد الأخرى.
(e) ليس أيٌّ واحد مما ورد سابقاً صحيحاً.

18. الأشعة ذات الترددات المنخفضة للغاية (ELF)
(a) لا تُنتَج بواسطة أجهزة العرض الكمبيوترية.
(b) ليست شكلاً من أشكال الحقول الكهرطيسية.
(c) ليس شكلاً من أشكال الأشعة المؤينة.
(d) ليست موضوعاً له أهمية بالنسبة للعلماء أو المهندسين.
(e) لا تُنتَج بواسطة الحقول الكهربائية أو المغنطيسية المتقلبة.

19. يدعى مسار التيار في الترانـــزيستور ذي التأثير الحقلي
(a) البوابة.
(b) القناة.
(c) القاعدة.
(d) الشريحة.
(e) المُجمِّع.

20. نظام الوحدات قدم-باوند-ثانية (fps)
(a) يُفضله العلماء في أوروبا.
(b) يُفضله العلماء في الولايات المتحدة.
(c) يستخدم من قبل بعض العموم.
(d) يُعرف أيضاً بالنظام الدولي.
(e) يعتمد على كميات مرتبطة بقوى العدد 10.

21. تحت أي شروط تكون المسافة أقصر بين نقطتين منحنية بدلاً من أن تكون خطاً مستقيماً؟
(a) لا توجد أي شروط تحقق ذلك
(b) عندما يكون الفضاء "مُسطحاً"
(c) عندما يتحرك مراقبان بالنسبة لبعضهما بسرعة ثابتة
(d) بوجود حقل جاذبية قوي

(e) كلما كانت الساعات غير متزامنة

22. أي العبارات (a أو b أو c أو d أو e) الواردة أدناه خاطئة؟

(a) التيار الوارد لأي نقطة في دارة dc كهربائية هو نفسه التيار الخارج من هذه النقطة.

(b) في دارة dc بسيطة، يتناسب التيار مع الجهد مقسوماً على المقاومة.

(c) إذا بقيت مقاومة مُكوِّن في دارة dc ثابتة، يتناقص التيار المار فيها بتناقص الجهد المُطبَّق على المقاومة.

(d) إذا تـضاعف الجهد المُطبَّق على مقاومة في دارة dc مع بقاء المقاومة ثابتة، تتضاعف الاستطاعة المُبددة في المقاومة.

(e) جميع العبارات صحيحة.

23. الباعث في ترانـزيستور *npn* ثنائي القطبية

(a) يجب وصله دائماً بأرضي كهربائي.

(b) يزود دائماً بإشارة خرج.

(c) طبقة رقيقة من النمط *p* بين طبقتين من النمط *n*.

(d) يتكون من مادة نصف ناقلة من النمط *n*.

(e) يتصرف عادةً كقطب تحكم.

24. عند تقسيم كمية شعاعية **v** (كشعاع السرعة) على كمية سُلّمية **k**، تكون النتيجة

(a) شعاع اتجاهه اتجاه **v** نفسه وطويلته 1/**k** من طويلة **v**.

(b) مقدار سُلّمي يساوي **v/k**.

(c) شعاع اتجاهه معاكس لاتجاه **v** وطويلته 1/**k** من طويلة **v**.

(d) مقدار سُلّمي يساوي **v/k**–.

(e) لا معنى له؛ لا يمكن قسمة شعاع على مقدار سُلّمي.

25. يعتمد معدل "جريان" الزمن على

(a) الوضع المطلق في الفضاء.

(b) شدة حقل الجاذبية.

(c) سرعة الضوء.

(d) شدة الحقل المغنطيسي الأرضي.

(e) كل ما ورد أعلاه.

26. يمكن أن تتحد عناصر مختلفة مع بعضها، متشاركة الإلكترونات. عند حدوث ذلك فالنتيجة هي

(a) أيون.

(b) مُركَّب.

(c) نظير.

(d) ناقل كهربائي.

(e) مادة مضادة.

27. افتـــرض أنه تم وضع غاز في حجرة صلبة محكمة الإغلاق تحت ضغط عالٍ. فجأة، سُمح لكمية كبيرة من الغاز بالخروج. ماذا يحدث؟

(a) يصبح الغاز داخل الحجرة أبرد.

(b) يصبح الغاز داخل الحجرة أسخن.

(c) يتناقص حجم الغاز داخل الحجرة.

(d) تزداد سرعة جزيئات الغاز داخل الحجرة.

(e) يتكاثف الغاز عند مغادرته الحجرة.

28. ســـتكون الاتصالات الراديوية ثنائية الاتجاه، والتي يستطيع عامل المحطة مقاطعة العامل الآخر في لحظة، مستحيلة بين المحطات على الأرض وبين أي مركبة فضاء تسير بين النجوم

(a) بسبب تمدد الزمن النسبي.

(b) بسبب الاختلاف في شعاع السرعة النسبية بين المحطتين.

(c) لأن سرعة انتشار الموجة الكهرطيسية 3×10^8 m/s فقط.

(d) بسبب انـــزياح أحمر.

(e) لا! الفرضية خاطئة؛ اتصالات كهذه ممكنة.

29. أي العبارات التالية خاطئة؟

(a) تستطيع الكتلة أن تكون منعدمة الوزن.

(b) تتناسب القوة مع الكتلة مضروبة بالتسارع.

(c) لكل فعل رد فعل يساويه في المقدار ويعاكسه في الاتجاه.

(d) الكتلة كمية شعاعية.

(e) شعاع السرعة له طويلة واتجاه.

30. يبلغ حجم عيِّنة من السائل 1.200 لتر. وتبلغ كتلتها 2.400 كيلوغرام. ما هي كثافتها؟

(a) 2.000 kg/m^3.

(b) 20.00 kg/m^3.

(c) 200.0 kg/m^3.

(d) 2,000 kg/m^3.

(e) لا يمكن تحديد الكثافة دون معرفة المزيد من المعلومات.

31. ينتج الحقل المغنطيسي الأرضي بواسطة
(a) الريح الشمسية.
(b) الأورورا.
(c) الأيونسفير.
(d) المعدن المنصهر الذي يدور داخل الأرض.
(e) النشاط الإشعاعي.

32. أي العبارات التالية *خاطئة*؟
(a) السرعة كمية سُلّمية، ولكن شعاع السرعة كمية شعاعية.
(b) يتكون شعاع السرعة من مُركّبة سرعة ومُركّبة اتجاه.
(c) يمكن أن تكون سرعة الجسم ثابتة ولكنَّ شعاع سرعته متغير.
(d) السرعة هي طويلة شعاع السرعة.
(e) لا توجد عبارة خاطئة؛ فجميع العبارات صحيحة.

33. إنّ قراءات سيلسيوس وفهرنهايت هي نفسها
(a) في الدرجة °0 على أي مقياس.
(b) في الدرجة °4 على أي مقياس.
(c) في الدرجة °100 على أي مقياس.
(d) في الدرجة °40- على أي مقياس.
(e) ولا في أي نقطة على أي مقياس.

34. افترض أنه تم وصل بطارية فانوس V-6.0 بطرفي مصباح ضوئي. أضاء المصباح (و لم يحترق) واستجر w 1.5 استطاعة. ما هو التيار المار في المصباح؟
(a) A 9.0.
(b) A 4.0.
(c) A 0.38.
(d) A 0.25.
(e) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

35. التحريض هو مُركّبة كهربائية معاكسة لتيار ac من خلال حفظ بعض الطاقة الكهربائية بشكل مؤقت على شكل
(a) حرارة.
(b) حقل مغنطيسي.

(c) حقل كهربائي.

(d) ضوء مرئي.

(e) كمية حركة.

36. يساوي عدد أفوغادرو 6.02×10^{23} تقريباً، وهو وحدة لكمية المادة تُعرف أيضاً

(a) بالمول.

(b) بالكانديلا.

(c) بالطن المتري.

(d) بالعدد الإجمالي.

(e) عدد ضخم جداً.

37. وفقاً لنظرية النسبية الخاصة لأينشتاين، فإن الأثير الحامل للضوء

(a) يمر في المادة بسهولة مروره في الفضاء.

(b) يؤثر في سرعة الضوء، اعتماداً على موقع المراقب.

(c) يؤثر في سرعة الضوء، اعتماداً على حركة المراقب.

(d) إنه المقياس المطلق للحركة في الكون.

(e) غير موجود بالضرورة.

38. يوجه حجر المغنطيس نفسه في اتجاه محدد بسبب

(a) التفاعل بينه وبين الحقل المغنطيسي الأرضي.

(b) تأثيرات الجاذبية.

(c) التأثيرات المتعلقة بالمد والجزر.

(d) دوران الأرض.

(e) حقيقة عدم انتظام شكله.

39. تضاف السعات على التسلسل كما تضاف

(a) التحريضات على التسلسل.

(b) المقاومات على التفرع.

(c) الجهود على التفرع.

(d) الحقول المغنطيسية على التسلسل.

(e) ولا أي مما ورد أعلاه.

40. حجم مقداره 1 ميلي ليتر (ml1) يساوي حجماً مقداره

(a) $1\ mm^3$.

(b) 1 cm^3.

(c) 1 mm^2.

(d) 1 cm^2.

(e) ولا أي مما ورد أعلاه.

41. الجسمية في التلسكوب العاكس هي

(a) مرآة مُحدَّبة.

(b) مرآة مُقعَّرة.

(c) عدسة مُحدَّبة.

(d) عدسة مُقعَّرة.

(e) عدسة مُقعَّرة مستوية.

42. يمتلك المجهر المُركَّب

(a) جسمية مُحدَّبة وعينية مُحدَّبة.

(b) جسمية مُقعَّرة وعينية مُقعَّرة.

(c) جسمية مُقعَّرة وعينية مُحدَّبة.

(d) جسمية مُحدَّبة وعينية مُقعَّرة.

(e) عدسة مُركَّبة واحدة.

43. مجمـــوع الجهود، عند الانتقال في دارة dc من نقطة ثابتة والعودة إليها من الاتجاه المعاكس، مع أخذ القطبية بالحسبان،

(a) يعتمد على التيار.

(b) يعتمد على عدد المُكوِّنات.

(c) صفر.

(d) موجب.

(e) سالب.

44. يستهلك جهاز ما طاقة بمعدل 1,200 جول بالدقيقة. وهذا يكافئ قولنا إن الجهاز يستهلك

(a) 20 erg.

(b) 20 نيوتن.

(c) 20 متر بالثانية مربع.

(d) 20 كيلوغرام بالثانية.

(e) 20 واط.

45. العدسة المُقرِّبة
(a) تحضر أشعة الضوء المتوازية إلى المحرق.
(b) تنشر أشعة الضوء المتوازية خارجاً.
(c) تجعل أشعة الضوء المتقاربة متوازية.
(d) تستطيع القيام بكل مما ورد في a، وb، وc.
(e) لا تستطيع القيام بأي من a أو b أو c.

46. أي من التالي لا يشكل متحولاً في الموجة الكهرطيسية؟
(a) التردد.
(b) السعة.
(c) الدور.
(d) الدقة.
(e) طول الموجة.

47. إن اصطلاح التعاكس بالطور لموجتين جيبيتين لهما التردد نفسه يعني أنهما تختلفان بالطور بمقدار
(a) صفر.
(b) $\pi/2$ راديان.
(c) π راديان.
(d) $3\pi/2$ راديان.
(e) 2π راديان.

48. بكل الاعتبارات، تظهر قوة التسارع تماماً كالقوة الناتجة
(a) عن الجاذبية الأرضية.
(b) عن تمدد الزمن.
(c) عن السرعات العالية.
(d) عن الحركة النسبية الثابتة.
(e) ولا أي مما ورد أعلاه.

49. يسمح diffraction
(a) لأمواج المحيط أن تتفاعل بحيث تُضخِّم تأثيرات بعضها البعض.
(b) للأمواج الصوتية أن تنتقل بشكل أسرع مما تنتقل به عادةً.
(c) بتوليد الأمواج الراديوية المتناغمة.
(d) للضوء وحيد اللون بالتحول إلى ضوء أبيض.
(e) للأمواج الصوتية بالانتشار حول الزوايا.

50. موجودات تكنولوجيا الدارات المتكاملة (IC)
(a) تسمح ببناء الدارات الدقيقة.
(b) تسمح ببناء الدارات المتوسطة، والأجهزة، والنظم.
(c) تستهلك قدرة أقل مما تستهلكه الدارات المكافئة المصنوعة من مُكوِّنات منفصلة.
(d) تحسن الأداء بتصغير المسافات بين المُكوِّنات الفعالة كل على حدة.
(e) تقوم بكل ما ورد أعلاه.

51. يمكن تحديد العمل الميكانيكي بدلالة حاصل ضرب
(a) القوة بالكتلة.
(b) القوة بالسرعة.
(c) القوة بالتسارع.
(d) القوة بالإزاحة.
(e) القوة بالطاقة.

52. بوجود نشاط شمسي غير طبيعي، تعكس "الأضواء الشمالية" عادةً الأمواج الراديوية في بعض الترددات. يدعى ذلك
(a) العاصفة المغنطيسية الأرضية.
(b) انتشار الأورورا.
(c) بالانعكاس الداخلي الكلي.
(d) بانتشار E المتقطع.
(e) الانتشار فضاء-موجة.

53. تُطبَّق قوة ثابتة 3.00 N على كتلة قيمتها 6.00 kg في الفضاء السحيق، بعيداً عن تأثير الجاذبية لأي نجم أو كوكب. ما هي طويلة التسارع؟
(a) لا يمكن تحديدها من هذه المعلومات.
(b) $0.500\ m/s^2$.
(c) $0.667\ m/s^2$.
(d) $1.50\ m/s^2$
(e) $2.00\ m/s^2$.

54. الأمواج المربعة، والخطية، وسن المنشار، والمثلثية
(a) عالية التردد بشكل لا نهائي.
(b) مُركَّبة من أمواج جيبية بنسب محددة.

(c) طول موجاهّا غير محدد.
(d) تتحرك بشكل أسرع من الأمواج الجيبية في الوسط نفسه.
(e) طاقتها مُركّزة في تردد واحد.

55. كثافة التدفق المغنطيسي في منطقة معينة قريبة من سلك يمر فيه تيار
(a) متناسبة عكسياً مع التيار المار في السلك.
(b) متناسبة طرداً مع التيار المار في السلك.
(c) متناسبة عكسياً مع مربع التيار المار في السلك.
(d) متناسب طرداً مع مربع التيار المار في السلك.
(e) ثابتة بغض النظر عن التيار المار في السلك.

56. وحدة الإشعاع المؤين التي تمثل انتقال نواة واحدة بالثانية هي
(a) الهرتز.
(b) متر بالثانية.
(c) البيكرل.
(d) الأمبير.
(e) الجول.

57. تم فحص ذرتين تمتلك نواتاهما العدد نفسه من البروتونات، ولكن لإحدى النوى نيترونين أكثر من الأخرى. تُمثّل هذه الذرات
(a) العنصر نفسه والنظير نفسه.
(b) عناصر مختلفة ولكن النظير نفسه.
(c) العنصر نفسه ولكن نظائر مختلفة.
(d) عناصر مختلفة ونظائر مختلفة.
(e) حالة مستحيلة؛ لا يمكن أن يحدث هذا السيناريو.

58. املأ الفراغ في الجملة التالية لتكون صحيحة:"بالنسبة لأي مُزوِّد طبيعي للأشعة المؤينة، كالراديوم أو اليورانيوم، يوجد ـــــــ والذي يشكل تابعاً لشدة الإشعاع بدلالة الزمن".
(a) طول موجة
(b) تردد
(c) دور
(d) منحنى التحلل
(e) عرض المجال.

59. افتـــرض أن للجهـــد ac له مُركّبة جهد dc، وأن مركبة الجهد هذه تزيد قمة السعة لجهد ac. قطبية الموجة الناتجة

(a) لا تتغير، والسعة تختلف.

(b) لا تتغير، على الرغم من اختلاف السعة.

(c) تتغير في التردد نفسه الذي تتغيّر عنده موجة ac.

(d) تتغير في نصف التردد الذي تتغيّر عنده موجة ac.

(e) لا يمكن وصفها دون معرفة المزيد من المعلومات.

60. يمكن تحديد كثافة غاز عنصر كالهيليوم بدلالة عدد ذرات

(a) الإزاحة.

(b) المساحة.

(c) الكتلة.

(d) الحجم.

(e) الوزن.

61. يدعى الثابت مثل e أو π، المُمثّل كعدد صرف دون وحدات مرافقة بالثابت

(a) الفيزيائي.

(b) النسبي.

(c) المطلق.

(d) النوعي.

(e) عديم البعد.

62. افتـــرض أن تردد موجة راديو 60 MHz. ما هو طول الموجة في الخلاء؟ اعتبر أن سرعة انتشار الموجة الكهرطيسية في الفضاء الحر مساوية 3.00×10^8 m/s.

(a) 5.0 m.

(b) 20 m.

(c) 180 m.

(d) 1.8×10^4 m.

(e) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

63. افتـــرض أنه تم تعليق سلك طوله 10.00 m في شجرة أثناء مساء حار عندما كانت درجة الحرارة 35°C. أثناء ساعات الفجر الأولى، انخفضت درجة الحرارة إلى 20°C، وكان قياس طول السلك 9.985 m. ما هو المعامل الخطي للتمدد الحراري لهذا السلك؟

(a) لا يمكن تحديده من هذه المعلومات.

(b) $10^{-5}/°C$.

(c) $10^{-4}/°C$.

(d) $0.001/°C$.

(e) $0.01/°C$.

64. يمكن أن يحدث الانعكاس الكلي الداخلي لحزمة ضوء

(a) ترتطم بلوح زجاجي من الخارج.

(b) تمر من خلال لوح زجاجي بزاوية قائمة.

(c) ترتطم بسطح موشور بزاوية مماسية من الداخل.

(d) تنتقل من مكان لآخر في الخلاء.

(e) لا يحدث تحت أي شروط.

65. يمكن أن تؤثر طبقة الأيونسفير الأرضية على

(a) انتشار الأمواج الضوئية.

(b) ناقلية الأسلاك النحاسية.

(c) شدة الانفجار الشمسي.

(d) انتشار الأمواج الراديوية بترددات معينة.

(e) الحجم الظاهري للنجوم البعيدة.

66. يكافئ النبضة

(a) تغير في الطاقة الحركية.

(b) تغير في الطاقة الكامنة.

(c) تغير في كمية الحركة.

(d) تغير في الكتلة.

(e) تغير في السرعة.

67. املأ الفراغ في الجملة التالية لتكون صحيحة: "إذا بدأت الموجة X قبل الموجة Y بجزء صغير من الدورة، إذا الموجة X ______________ الموجة Y في الطور".

(a) ترشد

(b) تتأخر عن

(c) تعاكس

(d) متعامدة على

(e) تتطابق مع

68. أي من الُمكوِّنات التالية يمكن استخدامه في بناء مُضخِّم جهد؟
(a) خلية كهركيميائية.
(b) مُولِّد كهربائي.
(c) خلية كهرضوئية.
(d) ترانـــزيستور ذو تأثير حقلي.
(e) ديود.
69. عند تحليل الماء كهربائياً،
(a) تُنـــزع البروتونات من نوى الذرات.
(b) يتحد الأوكسجين والهيدروجين.
(c) تنفصل ذرات الأوكسجين والهيدروجين عن بعضها البعض.
(d) تتشكل نظائر جديدة.
(e) يحدث الانشطار النووي.
70. ليكن لدينا جسم بدرجة حرارة ثابتة ومحددة، فإن العدد الذري يمثل درجة حرارة الجسم بالسيليسيوس
(a) أكبر بمقدار 273 تقريباً من العدد الذي يمثل درجة الحرارة بالكلفن.
(b) أقل بمقدار 460 تقريباً من العدد الذي يمثل درجة الحرارة بالكلفن.
(c) أكبر بمقدار 460 تقريباً من العدد الذي يمثل درجة الحرارة بالكلفن.
(d) أقل بمقدار 460 تقريباً من العدد الذي يمثل درجة الحرارة بالكلفن.
(e) يساوي تقريباً $^5/_9$ من العدد الذي يمثل درجة الحرارة بالكلفن.
71. تتكون الممانعة ذات العدد العقدي من
(a) مقاومة، وسعة، وتحريض.
(b) مفاعلة، وسعة، وتحريض.
(c) مفاعلة سعوية وتحريضية.
(d) مقاومة، ومفاعلة سعوية، ومفاعلة تحريضية.
(e) مفاعله، ومقاومة سعوية، ومقاومة تحريضية.
72. أي المقادير التالية تُمثِّل كمية سُلَّمية؟
(a) الإزاحة.
(b) شعاع السرعة.
(c) الكتلة.
(d) التسارع.

(e) كل ما ورد أعلاه.

73. يوجد في الموجة الجيبية الكاملة

(a) أنشوطتان وعقدتان.

(b) أنشوطتان وعقدة واحدة.

(c) عقدتان وأنشوطة واحد.

(d) عدد لا نهائي من العقد والأنشوطات.

(e) لا توجد أي عقدة أو أنشوطة.

74. يشير مصطلح الضوء الأسود إلى

(a) الأمواج الراديوية.

(b) الأشعة تحت الحمراء.

(c) الأشعة فوق البنفسجية.

(d) الضوء المرئي ذو الشدة المنخفضة للغاية.

(e) الضوء المرئي بطول موجة غير محدد.

75. الخاصة الهامة للجسم الصلب هي كثافته بالنسبة لكثافة الماء السائل في الدرجة C4°. تدعى تلك الخاصة

(a) بالكثافة المُميِّزة.

(b) بالكتلة المميّزة.

(c) بالوزن المميّز.

(d) بالحجم المميّز.

(e) بالجاذبية المميّزة.

76. تتناسب ضخامة الطاقة الحركية لجسم متحرك طرداً مع مربع

(a) كتلته.

(b) تسارعه.

(c) وزنه.

(d) إزاحته.

(e) سرعته.

77. المغنطيسية المتبقية هي مقياس قدرة المادة على

(a) عكس قطبيتها المغنطيسية.

(b) أن تصبح ممغنطة مؤقتاً.

(c) أن تصبح ممغنطة بشكل دائم.

(d) فقدان مغنطتها.

(e) تركيز خطوط التدفق المغنطيسي.

78. تشير البادئة بيكو (pico) في مقدمة الوحدة إلى

(a) 10^{-18} من الوحدة.

(b) 10^{-15} من الوحدة.

(c) 10^{-12} من الوحدة.

(d) 10^{12} ضعف الوحدة.

(e) 10^{18} ضعف الوحدة.

79. اتجاه حركة الموجة الكهرطيسية

(a) يوازي خطوط التدفق المغنطيسي.

(b) يوازي خطوط التدفق الكهربائي.

(c) يوازي خطوط التدفق المغنطيسي والكهربائي.

(d) لا يوازي خطوط التدفق المغنطيسي والكهربائي.

(e) يعتمد على طول الموجة.

80. تم ربط أربع مقاومات على التسلسل. إن مقاومة اثنين منهما 120 Ω. المقاومة الكلية

(a) 540 Ω.

(b) 270 Ω.

(c) 133 Ω .

(d) 33.3 Ω.

(e) لا يمكن حسابها من هذه المعلومات.

81. يبلغ قطر عدسة تلسكوب عدسة جسمية 250 mm. وتُستخدم عدسة عينية طولها المحرقي 10 mm. ما هو مقدار التكبير؟

(a) ×25

(b) ×2,500

(c) ×250

(d) ×10

(e) لا يمكن حسابه من هذه المعلومات.

82. في حجرة صلبة مملوءة بعنصر غازي كالأوكسجين بدرجة حرارة ثابتة،

(a) يتناسب ضغط الغاز مع عدد ذرات الغاز في الحجرة.

(b) يتناسب ضغط الغاز عكسياً مع عدد ذرات الغاز في الحجرة.

(c) لا يعتمد ضغط الغاز على عدد ذرات الغاز في الحجرة.

(d) يتناسب ضغط الغاز مع شدة الحقل الجاذبية الذي تتواجد الغرفة فيه.

(e) و لا عبارة مما ورد أعلاه.

83. وفقاً لنظرية النسبية الخاصة، يمكن أن تتجاوز سفينة فضاء سرعة الضوء

(a) إذا تحولت إلى مادة مضادة.

(b) لو أصبح الزمن يجري للخلف.

(c) إذا استخدمت نظم الدفع المضادة للجاذبية.

(d) إذا كان الفضاء منحنياً بجوار المركبة.

(e) ولا تحت أي ظروف.

84. يحدث الهيترودين بترددات مساوية

(a) لترددات أمواج الدخل.

(b) للمضاعفات الزوجية لترددات أمواج الدخل.

(c) للمضاعفات الفردية لترددات أمواج الدخل.

(d) لمضاعفات ترددات أمواج الدخل.

(e) لمجموع وفرق ترددات أمواج الدخل.

85. يكافئ 1 أوم رياضياً

(a) 1 فولت بالأمبير.

(b) 1 أمبير بالفولت.

(c) 1 واط-ثانية.

(d) 1 واط بالثانية.

(e) 1 جول بالثانية.

86. لتحويل هرتز إلى راديان بالثانية، يجب

(a) الضرب بالعدد 2π.

(b) الضرب بالعدد π.

(c) القسمة على 2π.

(d) القسمة على π.

(e) أن لا تقوم بشيء؛ الوحدتان متكافئتان.

87. إملأ الفراغ في الجملة التالية لتكون صحيحة: "تهتم نظرية النسبية العامة بالتسارع والجاذبية، وتهتم نظرية النسبية الخاصة ______________".

(a) بالثقوب السوداء والأقزام بالنجوم الصغيرة (الأقزام) البيضاء.

(b) بالحركة النسبية.

(c) بالسفر في الفضاء.

(d) الحركة المطلقة.

(e) بالانهيار الجانبي للكون.

88. املأ الفراغ لتكون الجملة التالية صحيحة:"يتحول الهيدروجين على ________ داخل الشمس؛ هذه العملية مسؤولة عن الطاقة الخارجة من الشمس".

(a) ليثيوم

(b) نحاس

(c) مادة مضادة

(d) هيليوم

(e) شكل مؤين

89. تتكون البطارية الشمسية التقليدية من

(a) خلايا زنك-كربون أو خلايا قلوية.

(b) خلايا كهرضوئية.

(c) ترانزستورات ثنائية القطب.

(d) ترانزستورات ذات تأثير حقلي.

(e) أي مما ورد أعلاه.

90. المادة التي تنتقل فيها الإلكترونات بسهولة من ذرة إلى ذرة هي مادة

(a) كهربائية صلبة.

(b) كهربائية سائلة.

(c) كهربائية غازية.

(d) عازلة كهربائياً.

(e) مادة ناقلة كهربائياً.

91. افترض أن لديك وعاء صلباً محكم الإغلاق مملوءاً بالهواء. تعتمد سرعة تحرك الجزيئات في الوعاء مباشرة على

(a) عدد الذرات داخل الوعاء.

(b) كتلة الهواء داخل الوعاء.

(c) درجة الهواء داخل الوعاء.

(d) حجم الوعاء.

(e) المدة التي بقي فيها الوعاء محكم الإغلاق.

92. تكسر عدسة جسمية بسيطة الضوء البرتقالي بشكل مختلف قليلاً عن كسرها للضوء الأزرق. يُلاحَظ ذلك في التلسكوب على أنه
(a) انكسار داخلي جزئي.
(b) انكسار انتقائي.
(c) زيغ لوني.
(d) غباشة.
(e) شوص.

93. إذا مر تيار ac تردده 60-Hz في سلك ملف، فإن الحقل المغنطيسي الناتج
(a) يمتلك قطبية ثابتة.
(b) يعكس قطبيته كل $^{1}/_{60}$ ثانية.
(c) يعكس قطبيته كل $^{1}/_{120}$ ثانية.
(d) صفر.
(e) يمغنط السلك بشكل دائم.

94. افترض أن سلكاً مستقيماً حاملاً للتيار يمر في ورقة مستوية بزاوية قائمة (أي أن السلك عامودي على الورقة). ما هي الأشكال العامة لخطوط التدفق المغنطيسي في المستوى الذي يحتوي الورقة؟
(a) خطوط مستقيمة متوازية
(b) خطوط مستقيمة تتجه خارجة من السلك
(c) قطوع زائدة متمركزة حول السلك
(d) دوائر متمركزة حول السلك
(e) يستحيل معرفة ذلك دون معرفة المزيد من المعلومات

95. الراديان هو وحدة
(a) النشاط الإشعاعي.
(b) لقياس الزوايا.
(c) درجة الحرارة.
(d) التيار الكهربائي.
(e) الجهد الكهربائي.

96. املأ الفراغ لتكون الجملة التالية صحيحة: "المفاعلة التحريضية لملف ______________ سعة قمة التيار ac المار فيها".
(a) متناسبة طرداً مع
(b) متناسبة طرداً مع مربع

(c) متناسبة عكسياً مع
(e) منفصلة عن

97. وفقاً لقانون خصوصية كمية الحركة، عند اصطدام عدة أجسام في نظام مثالي،
(a) كمية الحركة لكل جسم قبل الاصطدام هي نفسها بعد الاصطدام.
(b) ينقل كل جسم كمية حركته إلى أي جسم يصطدم به.
(c) كل جسم في النظام له كمية الحركة نفسها.
(d) لا تتغيّر كمية الحركة الكلية للنظام عند حدوث الاصطدام.
(e) كل مما ورد أعلاه صحيح.

98. تكون الطاقة في إشارة ac محتواة في طول موجة واحد في
(a) الموجة المربعة.
(b) موجة سن المنشار.
(c) موجة خطية.
(d) الموجة المستطيلة.
(e) ولا أي مما ورد أعلاه.

99. تُحدَّد الحرارة المُميِّزة بدلالة
(a) درجة سيلسيوس بالكيلوغرام.
(b) كالوري بالغرام.
(c) غرام بالدرجة سيلسيوس.
(d) كالوري بالغرام بالدرجة سيلسيوس.
(e) درجة سيلسيوس بالغرام بالكالوري.

100. افترض أنه تم تحليل ذرتين. الذرة X تمتلك 12 بروتوناً، و14 نتروناً، و12 إلكتروناً. والذرة Y تمتلك 12 بروتوناً، و12 نتروناً، و10 إلكترونات. أي العبارات التالية صحيحة؟
(a) الذرة X والذرة Y هما نظيران للعنصر نفسه؛ Y أيون وX لا.
(b) الذرة X والذرة Y نظيران مختلفان للعنصر نفسه، وكلاهما أيون.
(c) X وY عنصران مختلفان؛ Y أيون وX لا.
(d) X وY نظيران مختلفان للعنصر نفسه؛ Y أيون وX لا.
(e) X وY النظير نفسه لعناصر مختلفة؛ Y أيون وX لا.

أجوبة الاختبارات، والامتحانات، والامتحان النهائي

الفصل الأول

c. 1	b. 2	a. 3	d. 4	b. 5
c. 6	b. 7	a. 8	d. 9	a. 10

الفصل الثاني

c. 1	b. 2	a. 3	b. 4	c. 5
a. 6	d. 7	b. 8	a. 9	d. 10

الفصل الثالث

b. 1	b. 2	c. 3	c. 4	a. 5
d. 6	b. 7	c. 8	a. 9	d. 10

الفصل الرابع

c. 1	b. 2	d. 3	c. 4	a. 5
b. 6	b. 7	b. 8	a. 9	b. 10

الفصل الخامس

a. 1	a. 2	b. 3	d. 4	a. 5
d. 6	c. 7	a. 8	d. 9	c. 10

اختبار الباب صفر

c. 1	d. 2	b. 3	a. 4	e. 5
b. 6	d. 7	b. 8	a. 9	c. 10
a. 11	e. 12	b. 13	a. 14	e. 15
e. 16	c. 17	a. 18	c. 19	a. 20
c. 21	d. 22	c. 23	d. 24	c. 25
e. 26	c. 27	b. 28	c. 29	e. 30

c. 31	b. 32	a. 33	b. 34	e. 35
d. 36	a. 37	e. 38	d. 39	c. 40
e. 41	a. 42	b. 43	a. 44	c. 45
c. 46	e. 47	c. 48	c. 49	a. 50

الفصل السادس

b. 1	d. 2	a. 3	b. 4	c. 5
c. 6	c. 7	b. 8	d. 9	d. 10

الفصل السابع

c. 1	d. 2	a. 3	c. 4	b. 5
b. 6	d. 7	c. 8	a. 9	b. 10

الفصل الثامن

c. 1	b. 2	d. 3	d. 4	c. 5
a. 6	a. 7	c. 8	b. 9	b. 10

الفصل التاسع

b. 1	d. 2	b. 3	c. 4	c. 5
a. 6	a. 7	b. 8	a. 9	d. 10

الفصل العاشر

b. 1	a. 2	d. 3	d. 4	a. 5
c. 6	a. 7	b. 8	b. 9	c. 10

الفصل الحادي عشر

b. 1	a. 2	d. 3	b. 4	c. 5
c. 6	a. 7	b. 8	d. 9	c. 10

اختبار الباب الأول

a. 1	c. 2	d. 3	a. 4	b. 5
b. 6	a. 7	b. 8	c. 9	e. 10
e. 11	b. 12	a. 13	b. 14	d. 15
d. 16	d. 17	c. 18	e. 19	a. 20
e. 21	e. 22	b. 23	d. 24	c. 25
a. 26	e. 27	e. 28	a. 29	c. 30
d. 31	a. 32	b. 33	a. 34	b. 35
c. 36	b. 37	e. 38	a. 39	a. 40
d. 41	a. 42	d. 43	d. 44	a. 45
c. 46	e. 47	d. 48	d. 49	e. 50

الفصل الثاني عشر

d. 1	c. 2	b. 3	c. 4	a. 5
c. 6	d. 7	a. 8	b. 9	1. a 0

الفصل الثالث عشر

b. 1	c. 2	a. 3	c. 4	a. 5
a. 6	d. 7	b. 8	d. 9	d. 10

الفصل الرابع عشر

c. 1	d. 2	b. 3	c. 4	c. 5
d. 6	b. 7	d. 8	c. 9	b. 10

الفصل الخامس عشر

d. 1	c. 2	a. 3	a. 4	b. 5
a. 6	c. 7	b. 8	a. 9	a. 10

الفصل السادس عشر

a. 1	c. 2	d. 3	d. 4	c. 5
d. 6	a. 7	b. 8	a. 9	d. 10

اختبار الباب الثاني

a. 1	d. 2	b. 3	d. 4	c. 5
a. 6	d. 7	c. 8	e. 9	b. 10
e. 11	a. 12	e. 13	d. 14	a. 15
c. 16	c. 17	d. 18	d. 19	b. 20
e. 21	a. 22	a. 23	a. 24	a. 25
e. 26	e. 27	c. 28	e. 29	a. 30
b. 31	c. 32	c. 33	c. 34	c. 35
b. 36	c. 37	b. 38	a. 39	a. 40
c. 41	e. 42	e. 43	b. 44	a. 45
d. 46	e. 47	d. 48	c. 49	b. 50

الفصل السابع عشر

d. 1	c. 2	d. 3	c. 4	a. 5
a. 6	b. 7	a. 8	d. 9	c. 10

الفصل الثامن عشر

c. 1	d. 2	d. 3	b. 4	b. 5
d. 6	c. 7	a. 8	c. 9	c. 10

الفصل التاسع عشر

c. 1	d. 2	c. 3	b. 4	d. 5
d. 6	a. 7	b. 8	b. 9	a. 10

الفصل العشرون

d. 1	c. 2	a. 3	b. 4	c. 5
c. 6	d. 7	c. 8	b. 9	a. 10

اختبار الباب الثالث

c. 1	b. 2	d. 3	c. 4	d. 5
b. 6	b. 7	b. 8	b. 9	c. 10
c. 11	d. 12	e. 13	c. 14	c. 15
c. 16	b. 17	a. 18	e. 19	a. 20
a. 21	a. 22	c. 23	d. 24	a. 25
a. 26	a. 27	d. 28	e. 29	d. 30
e. 31	e. 32	c. 33	e. 34	d. 35
a. 36	c. 37	a. 38	a. 39	b. 40
e. 41	e. 42	d. 43	e. 44	c. 45
c. 46	b. 47	b. 48	b. 49	b. 50

الامتحان النهائي

b. 1	b. 2	c. 3	d. 4	d. 5
c. 6	b. 7	b. 8	c. 9	a. 10
c. 11	e. 12	b. 13	b. 14	b. 15
a. 16	a. 17	c. 18	b. 19	c. 20
d. 21	d. 22	d. 23	a. 24	b. 25
b. 26	a. 27	c. 28	d. 29	d. 30
d. 31	e. 32	d. 33	d. 34	b. 35
a. 36	e. 37	a. 38	b. 39	b. 40

a. 45	e. 44	c. 43	a. 42	b. 41
e. 50	e. 49	a. 48	c. 47	d. 46
b. 55	b. 54	b. 53	b. 52	d. 51
d. 60	b. 59	d. 58	c. 57	c. 56
d. 65	c. 64	c. 63	a. 62	e. 61
b. 70	c. 69	d. 68	a. 67	c. 66
e. 75	c. 74	a. 73	c. 72	d. 71
a. 80	d. 79	c. 78	c. 77	e. 76
a. 85	e. 84	e. 83	a. 82	e. 81
e. 90	b. 89	d. 88	b. 87	a. 86
b. 95	d. 94	c. 93	c. 92	c. 91
d. 100	d. 99	e. 98	d. 97	e. 96

مراجع إضافية مقترحة

- موجـــز الفيزياء الحديثة، Gautreau, Ronald, and William Savin. McGraw-Hill, New York, 1999
- 3000 مسألة محلولة في الفيزياء، Halpern, Alvin. McGraw-Hill, New York, 1988.
- الفيزياء الأساسية: دليل التعليم الذاتي- الطبعة الثانية، Kuhn, Karl F. Wiley, New York, 1996.
- فهم الكون: مدخل إلى الفيزياء والفيزياء الفلكية. Seaborn, James B. Springer Verlag, New York, 1997.

مواقع الوب

- الموسوعة البريطانية على الوب: www.britannica.com
- www.treasure-troues.com

ليس مطلوباً منك أن تكون عالماً فذاً لتفهم الفيزياء

يستطيع الآن اي قارىء يهتم بالعلوم الفيزيائية ان يجيد الفيزياء دون تعليم رسمي أو دون الغرق في المعادلات والصيغ المعقدة. حيث يقدم المؤلف ستان جيبلسكو الذي تحظى مؤلفاته بأفضل المبيعات في كتابه كشف أسرار الفيزياء، طريقة ممتعة، وفعالة، ومريحة بشكل كامل لتعلم المفاهيم العامة والأساسية في الفيزياء.

وعبر كتاب كشف أسرار الفيزياء ستتمكن من المادة خطوة بعد أخرى وبالسرعة التي تناسبك. وبعكس معظم الكتب حول هذا الموضوع فإن المفاهيم العامة تقدم أولاً - تتبعها التفاصيل. ولجعل عملية التعلم على أكبر قدر من الوضوح والبساطة، فقد تم تفصيل العمليات الجبرية الطويلة عبر طبقات متتالية أحادية الخطوات التنفيذية.

يقدم لك هذا الكتاب الفريد من نوعه:

- اسئلة في نهاية كل فصل وقسماً لصقل معرفتك واستكشاف نقاط ضعفك.
- اختبار نهائي مؤلف من 100 سؤال للتقييم الذاتي.
- تركيز على المسائل والكسور - حيث تكون الحاجة إلى المساعدة في أوجها.
- نماذج مفصلة مع الحلول.

سهل تماماً بالنسبة للقارىء المبتدىء، لكنه يشكل تحدياً بالنسبة للطالب المتقدم كتاب (كشف أسرار الفيزياء) هو طريقك المباشر لتعلم الفيزياء أو تجديد ما تعرفه عنها.

البيبليوغرافيا، مواضيع عامة
الفلسفة، علم النفس
الدين وعلم اللاهوت
القانون والعلوم الاجتماعية والعلوم التربوية
العلوم الطبيعية والدقيقة/ التطبيقية
الفنون، والألعاب والرياضة
الأدب
التاريخ والجغرافيا وكتب السيرة

الدار العربية للعلوم ناشرون
Arab Scientific Publishers, Inc.
www.asp.com.lb - www.aspbooks.com

عالم المعرفة
كشف اسرار الفيزياء دليل التعليم الذاتي
S.P950